



TUGAS AKHIR - TE 141599

DEMAGNETISASI ARUS *INRUSH* PADA
TRANSFORMATOR SATU FASA 1 kVA MENGGUNAKAN
METODE PENGURANGAN SISA MEDAN MAGNET
DENGAN SUMBER TENAGA BERFREKUENSI SANGAT
RENDAH

Dicky Wahyu Darmawan
NRP 2212100140

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TE 141599

*DEMAGNETIZATION OF INRUSH CURRENT ON SINGLE
PHASE TRANSFORMER 1 kVA USING REDUCTION OF
RESIDUAL MAGNETIC FIELD METHOD WITH ULTRA -
LOW FREQUENCY POWER SOURCE*

Dicky Wahyu Darmawan
NRP 2212100140

Advisor

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DEMAGNETISASI ARUS *INRUSH* PADA
TRANSFORMATOR SATU FASA 1 kVA
MENGUNAKAN METODE PENGURANGAN SISA
MEDAN MAGNET DENGAN SUMBER TENAGA
BERFREKUENSI SANGAT RENDAH**

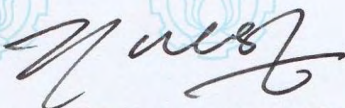
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr. Eng. I Made Y. Negara, S.T., M.Sc.
NIP 19700712 199802 1 001

Dosen Pembimbing II



Dedet C. Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP 19731119 200003 1 001



Halaman ini sengaja dikosongkan

DEMAGNETISASI ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR SATU FASA 1 kVA MENGGUNAKAN METODE PENGURANGAN SISA MEDAN MAGNET DENGAN SUMBER TEGANGAN BERFREKUENSI SANGAT RENDAH

Dicky Wahyu Darmawan
2212100140

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Dosen Pembimbing 2 : Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Pada penelitian ini akan membahas tentang pembuatan sebuah alat yang dirancang untuk menghilangkan fluks sisa pada inti transformator satu fasa 1 kVA. Tujuan utama dari menghilangkan fluks sisa pada transformator yaitu untuk mengurangi lonjakan arus *inrush* ketika transformator dienergisasi, dan meningkatkan keandalan dari transformator tersebut, hal ini lebih dimaksudkan untuk mengurangi rugi – rugi yang terjadi akibat adanya fluks sisa.

Saat ini ada banyak metode yang digunakan untuk mereduksi besarnya arus *inrush*. Diantaranya adalah menggunakan metode *shunt* kapasitor, *variable frequency – constant voltage* (VFCV), dan *variable voltage – constant frequency* (VVCF). Menggunakan metode *variable frequency – constant voltage*, alat demagnetisasi yang dibuat pada penelitian ini merupakan sebuah rangkaian saklar semikonduktor yang dirangkai dengan *input* sumber tegangan DC dan *output* yang dihubungkan dengan belitan primer tranformator. Alat ini berkerja dengan cara membolak-balik polaritas sumber tegangan DC sesuai pengaturan waktu yang telah ditentukan, sehingga frekuensinya berubah dari frekuensi rendah menjadi frekuensi tinggi.

Setelah dilakukan proses demagnetisasi menggunakan alat demagnetisasi tersebut, besarnya nilai arus *inrush* bisa berkurang hingga lebih dari 50%. Sebagai perbandingan, proses demagnetisasi yang dilakukan menggunakan alat dengan metode yang lain, yaitu VVCF, hanya mampu mengurangi arus *inrush* sebesar 37,3%. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses demagnetisasi menggunakan

metode VFCV hanya 1,46 detik saja atau 1 detik lebih cepat daripada metode VVCF.

Kata Kunci: Transformator satu fasa, alat demagnetisasi, dan *variable frequency – constant voltage*

DEMAGNETIZATION OF INRUSH CURRENT ON SINGLE PHASE TRANSFORMER 1 kVA USING REDUCTION OF RESIDUAL MAGNETIC FIELD METHOD WITH ULTRA – LOW FREQUENCY POWER SOURCE

Dicky Wahyu Darmawan
2212100140

1st Advisor : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
2nd Advisor : Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

A device that designed to eliminate residual flux in a single phase transformer 1 kVA is discussed in this research. Reducing inrush current spike when the transformer is energized, and improve the reliability of the transformer are the main purpose of eliminating residual flux in the transformer core, it is intended to reduce losses that occur due to residual flux.

The amount of inrush current is reduced by many methods today. Among them are using shunt capacitors, variable frequency - constant voltage (VFCV), and variable voltage - constant frequency (VVCV). Using the method of variable frequency - constant voltage, demagnetizing device is a semiconductor switching circuit that is coupled to DC voltage source for the input and the output is connected to the primary winding of transformer. This device works by flipping through the polarity of the DC voltage source according to the setting time specified, so that the frequency is started from low frequency into high frequency.

After demagnetization process using that device, then the value of the inrush current can be reduced by up to 50%. For comparison, the demagnetization process is done using the tool to the other methods, named VVCV, only capable of reducing inrush current 37.3%. In addition, the time required to perform the demagnetization process using VFCV method only 1.46 seconds or 1 second faster than VVCV method.

Key Words: One Phase Transformer, Demagnetizing Device, Variable Frequency – Constant Voltage.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi.....	3
1.4.1 Tahap Perancangan Sistem	3
1.4.2 Tahap Pengujian Sistem	3
1.4.3 Tahap Analisis.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
1.6 Relevansi atau Manfaat	4
 BAB 2 ARUS <i>INRUSH</i> DAN METODE <i>VARIABLE FREQUENCY</i> – <i>CONSTANT VOLTAGE</i> UNTUK PROSES DEMAGNETISASI.....	 5
2.1 Transformator Satu Fasa.....	5
2.2 Arus <i>Inrush</i> Transformator	7
2.3 Metode <i>Variable Frequency – Constant Voltage</i>	9
 BAB 3 PENGUJIAN TRANSFORMATOR SATU FASA DAN PERANCANGAN ALAT DEMAGNETISASI ARUS <i>INRUSH</i> DENGAN SUMBER TENAGA BERFREKUENSI SANGAT RENDAH.....	 11
3.1 Pengujian Arus Saturasi Transformator Satu Fasa 1 kVA	11
3.2 Pengujian DC (DC Test).....	15
3.3 Perancangan Alat Demagnetisasi Arus <i>Inrush</i> dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah.	16

3.4	Pembacaan Arus <i>Inrush</i> Menggunakan <i>Data Acquisition</i> dan Pengolahan Data Menggunakan Perangkat Lunak.....	24
BAB 4	PENGUJIAN ALAT DEMAGNETISASI ARUS <i>INRUSH</i> DENGAN SUMBER TENAGA BERFREKUENSI SANGAT RENDAH DAN ANALISA DATA	27
4.1	Pengujian Alat Demagnetisasi.....	27
4.2	Pengujian Arus <i>Inrush</i>	29
4.2.1	Perbandingan Arus <i>Inrush</i> Sudut Penyalaan 0°.....	33
4.2.2	Perbandingan Arus <i>Inrush</i> Sudut Penyalaan 90°.....	36
4.3	Analisa Data	39
BAB 5	PENUTUP	43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	44
DAFTAR PUSTAKA		45
LAMPIRAN.....		47
RIWAYAT HIDUP		51

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Spesifikasi transformator uji.....	11
Tabel 3.2.	Hasil pengujian hubung singkat pada transformator 1 fasa	16
Tabel 4.1.	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0 °	39
Tabel 4.2.	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> sudut penyalan 90°	40
Tabel 4.3.	Hasil demagnetisasi arus <i>inrush</i> menggunakan metode VVCF	41
Tabel 5.1.	Hasil pengujian kondisi saturasi pada transformator satu fasa	47

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Transformator satu fasa	5
Gambar 2.2.	Tipe – tipe inti transformator [1]	6
Gambar 2.3.	Model pemotongan inti besi pada transformator	7
Gambar 2.4.	Pengaruh fluks sisa terhadap arus inrush [1]	8
Gambar 2.5.	Metode VFCV [1]]	9
Gambar 2.6.	Hubungan tegangan, arus, dan fluks [1]	10
Gambar 3.1	Rangkaian pengujian tanpa beban (<i>open circuit</i>)	11
Gambar 3.2.	Rangkaian ekivalen transformator penelitian	13
Gambar 3.3.	Kurva kondisi saturasi pada transformtor	14
Gambar 3.4.	Rangkaian pengujian DC	15
Gambar 3.5.	Rancangan alat demagnetisasi	17
Gambar 3.6.	Sumber DC 1.....	19
Gambar 3.7.	Sumber DC 2.....	20
Gambar 3.8.	Alat demagnetisasi	21
Gambar 3.9.	Metode pensaklaran alat demagnetisasi.....	23
Gambar 3.10.	DAQ 9246	24
Gambar 3.11.	DAQ 9223	25
Gambar 4.1.	Gelombang tegangan dan arus keluaran alat demagnetisasi	27
Gambar 4.2.	Frekuensi saturasi gelombang keluaran alat demagnetisasi	28
Gambar 4.3.	Diagram proses pengujian arus <i>inrush</i>	29
Gambar 4.4.	Modul pensaklaran	30
Gambar 4.5.	Proses kalibrasi modul pensaklaran pada (a) 0° dan (b) 90°	31
Gambar 4.6.	Pengaruh fluks terhadap arus <i>inrush</i>	31
Gambar 4.7.	Pengaruh sudut penyalan tegangan masukan terhadap arus inrush.....	32
Gambar 4.8.	Percobaan 1 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0°.....	33
Gambar 4.9.	Percobaan 2 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0°.....	34
Gambar 4.10.	Percobaan 3 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0°.....	34
Gambar 4.11.	Percobaan 4 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0°.....	35
Gambar 4.12.	Percobaan 5 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 0°.....	35
Gambar 4.13.	Percobaan 1 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 90°	36
Gambar 4.14.	Percobaan 2 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 90°	37
Gambar 4.15.	Percobaan 3 arus <i>inrush</i> sudut penyalan 90°	37

Gambar 4.16. Percobaan 4 arus *inrush* sudut penyalaaan 90°38

Gambar 4.17. Percobaan 5 arus *inrush* sudut penyalaaan 90°38

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan peralatan induksi – elektromagnetik yang paling banyak digunakan pada sistem kelistrikan. Hal ini disebabkan oleh jaringan transmisi dan distribusi jarak jauh yang diterapkan di Indonesia. Jarak antara pembangkit listrik dan beban terletak sangat jauh sehingga membutuhkan transformator daya untuk menaikkan dan menurunkan tegangan agar rugi – rugi yang dihasilkan selama proses penyaluran tenaga listrik dapat diminimalisir. Salah satu fenomena transformator yang tidak diinginkan adalah arus *inrush*. Ketika transformator dihubungkan dengan tegangan arus bolak balik maka akan ada arus yang besarnya melebihi arus nominal yang melewati belitan transformator tersebut, itulah yang dinamakan arus *inrush*. Besarnya bisa 8 hingga 10 kali arus beban penuh tergantung dari besarnya fluks sisa pada inti transformator dan impedansi rangkaian. Dampak negatif yang dihasilkan oleh arus *inrush* diantaranya:

- Memungkinkan terjadinya kesalahan operasi pada sistem pengaman beban lebih dan gangguan internal yang menyebabkan lepasnya transformator dari sistem.
- Dapat merusak transformator karena kerusakan mekanik pada belitan yang teraliri arus *inrush*.
- Timbulnya masalah kualitas daya pada sistem kelistrikan (*overvoltages* dan *voltage sags*)

Hal itu tentunya dapat merugikan industri – industri yang menggunakan transformator sebagai salah satu komponen pada sistem kelistrikannya. Oleh karena itu, diperlukan adanya sebuah alat yang dapat mengurangi arus *inrush* untuk menghindari dampak negatif yang telah disebutkan diatas dan menambah *lifetime* dari transformator tersebut.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengurangi arus *inrush* transformator antara lain, *sequential phase energization*, menggunakan kapasitor, *pre-insertion* resistor, *auxiliary load*; metode pengurangan fluks sisa [1], [2] dan metode pengontrolan waktu peralihan (*switching time*) [3], [4]. Tiap – tiap metode itu memiliki kelebihan dan kekurangannya masing – masing. Saat ini sudah ditemukan metode paling efektif untuk mengurangi arus *inrush*, yaitu dengan mendemagnetisasi inti transformator.

Dalam Tugas Akhir ini, “Demagnetisasi Arus *Inrush* pada Transformator Satu Fasa 1 kVA Menggunakan Metode Pengurangan Sisa Medan Magnet dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah”, akan dikembangkan metode *Variable Frequency – Constant Voltage* (VFCV) untuk mendemagnetisasi inti besi pada sebuah transformator satu fasa 1 kVA. Metode ini nantinya dikembangkan sedemikian rupa dan diharapkan dapat diaplikasikan menjadi sebuah alat yang memanfaatkan sebuah sumber DC dan dirangkai dengan rangkaian inverter DC ke AC agar menghasilkan arus bolak balik yang nantinya diinjeksikan ke inti transformator dalam rentang waktu tertentu sebelum dihubungkan dengan sumber tegangan 220 Volt (energisasi). Kelebihan dari metode VFCV ini adalah proses demagnetisasi yang singkat sehingga dapat mempercepat proses energisasi transformator tersebut.

1.2 Permasalahan

Adapun fokus permasalahan yang terdapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode VFCV sebagai metode pengurangan arus *inrush* pada transformator masih kurang optimal karena metode – metode demagnetisasi yang lain seperti *Variable Voltage – Constant Frequency* sudah terbukti dapat mengurangi arus *inrush*.
2. Pembuktian keefektifan metode VFCV untuk mengurangi arus *inrush* sejauh ini hanya sebatas simulasi pada sebuah *software*.
3. Saat ini belum ditemukan alat demagnetisasi arus *inrush* berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* yang beredar di pasaran, sehingga rancangan ataupun desain dari pembuatan alat tersebut harus dimulai dari nol.
4. *Troubleshooting* dari alat tersebut nantinya akan memakan waktu yang cukup lama agar hasil uji coba laboratorium sama dengan atau mendekati hasil simulasi pada *software* yang digunakan.

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk mengurangi arus *inrush* pada transformator satu fasa 1 kVA berbasiskan metode *Variable Frequency – Constant Voltage*. Selain itu, alat elektronik yang dirancang berdasarkan metode tersebut nantinya diharapkan dapat melakukan proses demagnetisasi secara optimal dan cepat sehingga dapat mengurangi

kerugian yang diakibatkan oleh arus *inrush* saat proses energisasi transformator.

1.4 Metodologi

Metode yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap perancangan sistem, tahap pengujian sistem dan tahap analisis, adapun keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.4.1. Tahap Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan dengan melakukan beberapa eksperimen pada transformator yaitu kondisi saturasi dan pengujian DC transformator, perancangan desain alat demagnetisasi, serta pengukuran dan penentuan kondisi awal maupun modifikasi komponen yang digunakan oleh alat tersebut. Adapun langkah-langkah pada tahap pengambilan data antara lain:

1. Pengujian Transformator, dilakukan untuk mencari kondisi saturasi pada inti transformator sehingga nantinya akan didapatkan nilai arus saturasi. Selain itu dilakukan pengujian DC pada transformator uji tersebut. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan nilai resistansi belitan pada transformator. Nilai arus saturasi dan resistansi belitan transformator digunakan sebagai parameter untuk menentukan besarnya suplai sumber tegangan DC untuk alat demagnetisasi.

2. Perancangan Alat Demagnetisasi, proses ini dilakukan untuk mendapatkan sebuah desain alat yang digunakan untuk mengurangi tingginya arus *inrush*. Alat yang dirancang harus ekonomis, *portable*, dan mudah untuk dioperasikan. Komponen yang digunakan harus sesuai dengan data – data yang telah didapatkan setelah tahap pengujian sistem selesai dilakukan.

1.4.2. Tahap Pengujian Sistem

Dalam tahap ini, sistem yang telah dirancang sebelumnya yaitu pengukuran arus *inrush* transformator satu fasa dan juga alat demagnetisasi, akan mengalami proses pengujian. Proses pengujian yang dilakukan akan melibatkan beberapa parameter yang mendukung kinerja sistem sehingga dapat memudahkan proses selanjutnya.

1.4.3. Tahap Analisis

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan. Kondisi transformator yang diteliti akan dianalisa dan dievaluasi karena berkaitan dengan proses demagnetisasi arus *inrush*. Tahap analisis dilakukan pada tiap kondisi pengukuran arus *inrush* dan lamanya proses demagnetisasi, serta juga

akan memperbandingkan keunggulan sistem yang telah dirancang dengan sistem lain yang sudah ada.

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir berjudul “Demagnetisasi Arus *Inrush* pada Transformator Satu Fasa 1 kVA Menggunakan Metode Pengurangan Sisa Medan Magnet dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah”, ini dibagi menjadi lima bab. Adapun susunannya adalah sebagai berikut:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan tugas akhir.

BAB 2. Arus *Inrush* dan Metode *Variable Frequency – Constant Voltage* Untuk Proses Demagnetisasi

Bab ini berisi teori - teori penunjang yang berhubungan dengan proses demagnetisasi arus *inrush* yang dibahas pada tugas akhir ini. Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir.

BAB 3. Pengujian Transformator Satu Fasa dan Perancangan Alat Demagnetisasi Arus *Inrush* dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah

Bab ini berisi tentang bagaimana cara mendapatkan parameter transformator melalui beberapa tahap pengujian dan perancangan alat demagnetisasi arus *inrush* pada transformator satu fasa yang diuji.

BAB 4. Pengujian Alat Demagnetisasi Arus *Inrush* dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah dan Analisa Data

Bab ini berisi tentang pengujian dari alat demagnetisasi arus *inrush* yang telah dirancang beserta analisisnya.

BAB 5. Penutup

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi, eksperimen, dan pengujian yang telah dilakukan.

1.6 Relevansi atau Manfaat

Tugas akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai metode demagnetisasi arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan optimal dan lebih akurat, serta dapat menginspirasi sekaligus sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang lebih dalam.

BAB 2

ARUS INRUSH DAN METODE *VARIABLE FREQUENCY – CONSTANT VOLTAGE* UNTUK PROSES DEMAGNETISASI

2.1. Transformator Satu Fasa

Transformator satu fasa yang akan digunakan pada penelitian tugas akhir kali ini, seperti yang ditunjukkan gambar 2.1, memiliki fungsi sebagai transformator *step down*.



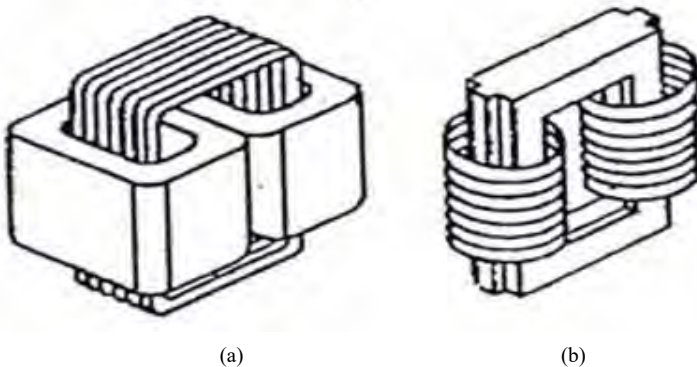
Gambar 2.1 Transformator satu fasa

Transformator step down berfungsi untuk menurunkan daya dari 220 Volt menjadi 127 Volt. Transformator jenis ini memiliki kumparan primer yang lebih banyak dibandingkan dengan kumparan pada sisi sekunder. Hal tersebut mengacu pada persamaan 2.1.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.1)$$

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa transformator tersusun dari dua atau lebih kumparan yang dililitkan pada inti besi. Kumparan primer adalah kumparan yang terhubung ke sumber, sedangkan kumparan sekunder adalah kumparan yang terhubung ke beban. Secara umum, berdasar cara lilitan pada kumparan inti dikenal dua tipe transformator yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Pada tipe inti,

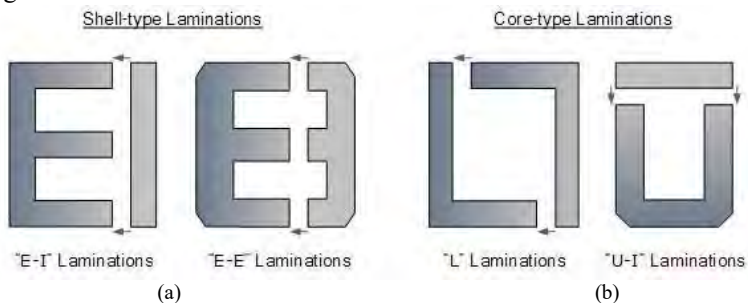
bagian inti transformator berupa batangan segi empat dengan kumparan dililitkan pada dua sisi. Sementara bagian inti transformator tipe cangkang terdiri dari tiga lengan dengan kumparan dililitkan pada lengan tengah inti. Inti trafo disusun atas lapisan-lapisan tipis yang diisolasi secara elektrik antara satu lapisan dengan yang lain untuk meminimalkan arus eddy.



Gambar 2.2 Tipe – tipe inti transformator [1]:
(a) Transformator tipe cangkang (*shell*)
(b) Transformator tipe inti (*core*)

Selain bagian inti yang telah disebutkan tadi, transformator juga memiliki tipe pemotongan yang berbeda. Jika kita amati gambar 2.3, untuk transformator dengan tipe cangkang (*shell*), model pemotongannya biasanya berbentuk “E – I” dan “E – E”, sedangkan transformator dengan tipe inti (*core*) memiliki model pemotongan “L” dan “U – I”. Pada prakteknya, inti besi dibuat berlapis – lapis untuk mengurangi rugi – rugi pada transformator. Karena tidak terdapat bagian – bagian yang bergerak atau berputar dari suatu transformator maka transformator tidak memiliki rugi-rugi gesekan. Akibatnya sebagian besar transformator memiliki efisiensi 90%. Meskipun demikian, terdapat juga rugi-rugi yang muncul pada transformator yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok rugi – rugi utama yaitu rugi – rugi tembaga dan rugi – rugi besi. Rugi – rugi tembaga terjadi karena resistansi dalam belitan. Rugi – rugi ini akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatkan arus beban akan meningkatkan rugi – rugi tembaga. Rugi – rugi besi terdiri atas rugi histerisis dan rugi arus eddy. Besarnya rugi – rugi histerisis bergantung pada jenis besi yang digunakan untuk inti

transformator. Dengan demikian, dalam praktiknya pemilihan bahan inti harus dipertimbangkan dengan baik untuk menghindari rugi - rugi histerisis yang terlalu besar. Seperti telah disebutkan sebelumnya, transformator hanya bekerja untuk suplai tegangan bolak - balik. Jadi, arus yang digunakan untuk membangkitkan fluks inti akan berubah terus menerus dari nilai positif ke nilai negatif. Setiap saat terjadinya pembalikan arus akan terjadi pula pembalikan fluks magnetik. Akibat dari terjadinya fluks yang dibangkitkan dan kemudian runtuh secara berulang-ulang di dalam inti transformator inilah yang akan menimbulkan rugi - rugi histerisis.



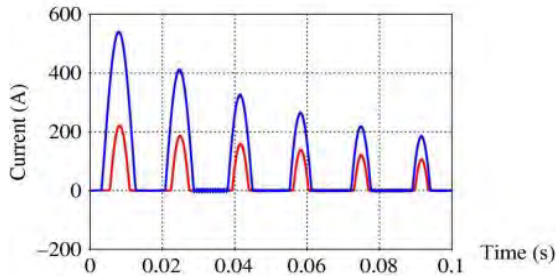
Gambar 2.3 Model pemotongan inti besi pada transformator:

- (a) Transformator tipe cangkang (*shell*)
- (b) Transformator tipe inti (*core*)

2.2. Arus Inrush Transformator

Saat transformator pertama kali dihubungkan ke sumber tegangan bolak - balik, maka akan muncul aliran arus magnetisasi yang mengalir melalui kumparan primer dari transformator. Arus tersebut digunakan untuk proses energisasi yaitu agar muncul fluks pada inti ferromagnetik. Arus magnetik pada awal proses energisasi biasanya memiliki nilai hingga 8 hingga 12 kali lebih besar dari arus beban penuh transformator. Arus itulah yang dinamakan arus *inrush* dan merupakan salah satu fenomena transien yang dapat terjadi pada sistem kelistrikan. Besarnya nilai arus *inrush* tergantung dari magnitudo tegangan sumber, fluks sisa di dalam inti transformator, dan impedansi total dari rangkaian saat dihubungkan dengan sumber tegangan listrik. Arus ini diperlukan sampai nilai maksimum fluks mencapai kondisi tunak dan inti menjadi jenuh [5], [6]. Arus inrush terdiri dari 2 bagian antara lain arus magnetisasi, yakni arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator,

dan arus rugi inti, yakni arus yang diperlukan untuk rugi histerisis dan rugi arus eddy terjadi.



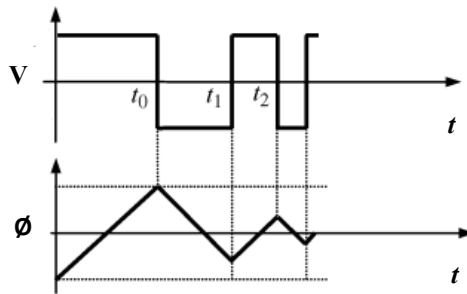
Gambar 2.4 Pengaruh fluks sisa terhadap arus inrush [1]

Arus inrush terjadi di dalam transformator ketika fluks sisa tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi tunak. Laju perubahan fluks sesaat di dalam transformator sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada lilitan yang terhubung sumber. Selama transformator beroperasi secara kontinyu, kondisi fluks puncak berada di nilai negatif saat tegangan berada pada titik nol. Namun, selama proses energisasi, fluks pada inti transformator harus bermula pada titik nol. Sehingga untuk menaikkan tegangan dari nol fluks magnet akan mencapai nilai puncak berkali lipat dibandingkan dengan kondisi normal. Akibat ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi, pada kondisi saturasi jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding dibutuhkan untuk membangkitkan fluks magnet. Sehingga arus kumparan yang dibutuhkan untuk membuat gaya gerak magnet agar dapat menimbulkan fluks pada inti transformator akan meningkat dibandingkan pada kondisi normal.

Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh fluks sisa terhadap besarnya nilai arus inrush yang mengalir pada kumparan primer transformator saat pertama kali dienergisasi dengan sumber tegangan bolak – balik. Dapat dilihat, saat tidak ada fluks sisa pada inti transformator, arus inrush hanya sebesar 200 Ampere. Sedangkan saat ada fluks sisa, terjadi lonjakan arus hingga mencapai 3 kali lipat. Tentu hal tersebut bisa sangat merugikan karena dapat menyebabkan kegagalan koordinasi sistem proteksi arus lebih dan merusak belitan transformator apabila keadaan tersebut terjadi terus menerus.

2.3 Metode *Variable Frequency – Constant Voltage*

Ada banyak cara untuk mengurangi besarnya arus *inrush* dan mendemagnetisasi fluks sisa pada inti transformator. Salah satu cara yang paling mudah adalah menggunakan metode VFCV atau *Variable Frequency – Constant Voltage*, gambar 2.5. Metode ini memanfaatkan sumber tegangan DC yang diubah menjadi keluaran tegangan AC berbentuk kotak. Frekuensi yang digunakan berubah tiap setengah periode dengan frekuensi awalan yang sangat rendah. Seiring berjalannya waktu, frekuensi tadi akan bertambah cepat di setiap periode setengah gelombang.



Gambar 2.5 Metode VFCV [1]

Prinsip pengurangan fluks sisa menggunakan metode demagnetisasi ini didapatkan dari hukum Faraday yaitu ketika sebuah sumber searah dihubungkan ke induktor, maka arus pada induktor tersebut akan naik secara linier terhadap waktu sesuai dengan besarnya tegangan *input* dari sumber tadi. Kenaikan arus secara linier terhadap waktu dapat ditulis dengan persamaan berikut,

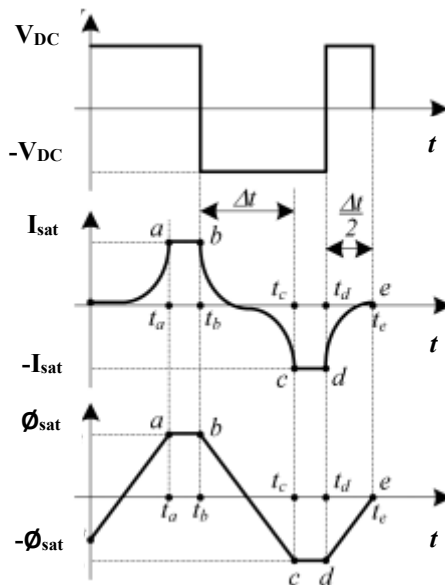
$$i(t) = \int v(t) \cdot dt = \frac{V}{L} t \quad (2.1)$$

Proses demagnetisasi dimulai ketika $t = t_0$, Saat arus sudah mencapai nilai maksimum I_{\max} , maka polaritas tegangan yang tadinya positif diubah ke polaritas negatif. Kemudian arus yang tadinya sudah berada pada puncak polaritas positif akan menurun secara linear hingga mencapai titik saturasi negatif pada waktu $t = 3 t_0$. Pada titik itu, terbentuk sebuah gelombang kotak dengan frekuensi sebesar $1/T$ dimana T merupakan periode

gelombang antara 0 hingga ke $3t_0$. Gelombang fluks yang terbentuk pada proses demagnetisasi juga berbentuk seperti gelombang arus, gambar 2.6. Bentuk gelombang fluks yang sama dengan gelombang arus terjadi karena fluks berbanding lurus dengan arus magnetisasi sehingga terjadi kenaikan maupun penurunan fluks secara linier terhadap tegangan masukan atau *input*. Hal tersebut didasarkan pada persamaan berikut,

$$\Phi = L i \quad (2.2)$$

persamaan 2.2 menunjukkan bahwa fluks (Φ) berbanding lurus terhadap kenaikan maupun penurunan arus (i) karena nilai induktor L tidak akan berubah sebab induktansi berhubungan dengan jumlah belitan dan jenis kawat belitannya.



Gambar 2.6 Hubungan tegangan, arus, dan fluks [1]

BAB 3

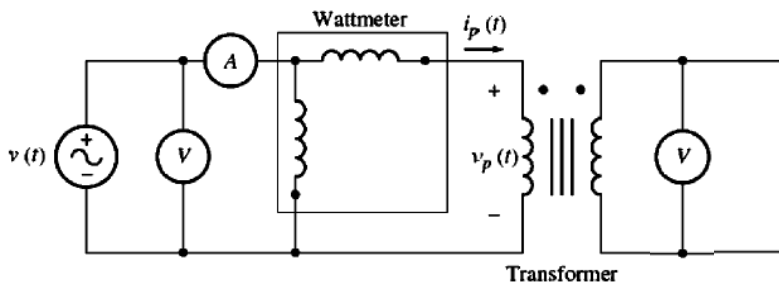
PENGUJIAN TRANSFORMATOR SATU FASA DAN PERANCANGAN ALAT DEMAGNETISASI ARUS INRUSH DENGAN SUMBER TENAGA BERFREKUENSI SANGAT RENDAH

3.1. Pengujian Arus Saturasi Transformator Satu Fasa 1 kVA

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator uji

Tipe	Shell
Fasa	1
Daya	1 kVA
Tegangan Primer	220 Volt
Tegangan Sekunder	127 Volt
Belitan Primer	255
Belitan Sekunder	147
Frekuensi	50 Hz

Sebuah transformator perlu diuji di laboratorium untuk mengetahui parameter - parameter dari transformator. Salah satu parameter yang dicari saat pengujian tanpa beban kali ini adalah kondisi saturasi pada transformator uji yang merupakan transformator daya penurun tegangan (*step down*) berkapasitas 1 kVA dengan tegangan sebesar 220 volt di sisi primer dan 127 volt di sisi sekunder.



Gambar 3.1 Rangkaian pengujian tanpa beban (*open circuit*)

Pada pengujian hubung terbuka ini dilakukan pencarian kondisi saturasi pada inti transformator. Saat mencapai kondisi saturasi, akan terbentuk kurva arus magnetisasi terhadap tegangan. Cara pengujian kondisi saturasi pada transformator adalah sebagai berikut:

1. Menghubungkan sumber tegangan bolak balik ke sisi primer transformator.
2. Pada sisi primer juga dihubungkan dengan alat ukur berupa voltmeter, amperemeter, dan wattmeter.
3. Pada sisi sekunder dihubungkan voltmeter secara parallel.
4. Naikkan tegangan suplai secara perlahan hingga voltmeter di sisi primer menunjukkan nilai tegangan maksimal dari suplai tersebut yaitu sebesar 380 volt.
5. Setelah tegangan di sisi suplai telah mencapai rating maksimal yaitu 380 volt, kita lihat nilai P_p , V_p , dan I_p di sisi primer transformator.
6. Kemudian turunkan lagi tegangan suplai secara perlahan hingga voltmeter di sisi primer menunjukkan nilai tegangan minimal dari suplai tersebut yaitu sebesar 0 volt.
7. Setelah tegangan di sisi suplai telah mencapai rating minimal yaitu 0 volt, kita lihat nilai P_p , V_p , dan I_p di sisi primer transformator.
8. Plotting kurva magnetisasi dilakukan tiap 10 volt. Sehingga pencatatan P_p , V_p , dan I_p dilakukan setiap terjadi peningkatan pada tegangan suplai sebesar 10 volt.

Setelah proses pengujian selesai dilakukan, maka didapatkan hasil pengukuran berupa tegangan, arus, dan daya pada sisi primer dan tegangan sekunder transformator. Hasil pengujian hubung terbuka dapat dilihat pada tabel 5.1 (lampiran).

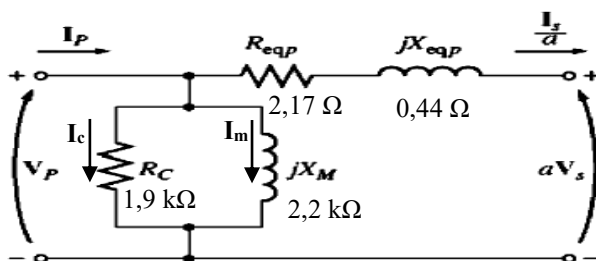
Setelah melakukan pengujian kondisi saturasi pada transformator, dilakukan perhitungan faktor daya untuk mencari arus magnetisasi (I_m) yang sudah disajikan dalam bentuk tabel 5.1 melalui persamaan berikut,

$$PF = \frac{P_p}{V_p \cdot I_p} \quad (3.1)$$

Kemudian mencari nilai sudut (θ),

$$\theta = \cos^{-1} (PF) \quad (3.2)$$

Sebelum menuju ke langkah selanjutnya, dianalisa dahulu hubungan antara tegangan dan arus serta fluks magnetisasi. Seperti yang diketahui, umumnya arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan sebesar 90° . Dari teorema tersebut didapatkan persamaan untuk mencari nilai arus rugi – rugi pada transformator serta arus magnetisasi yang digunakan untuk membangkitkan fluks awal.



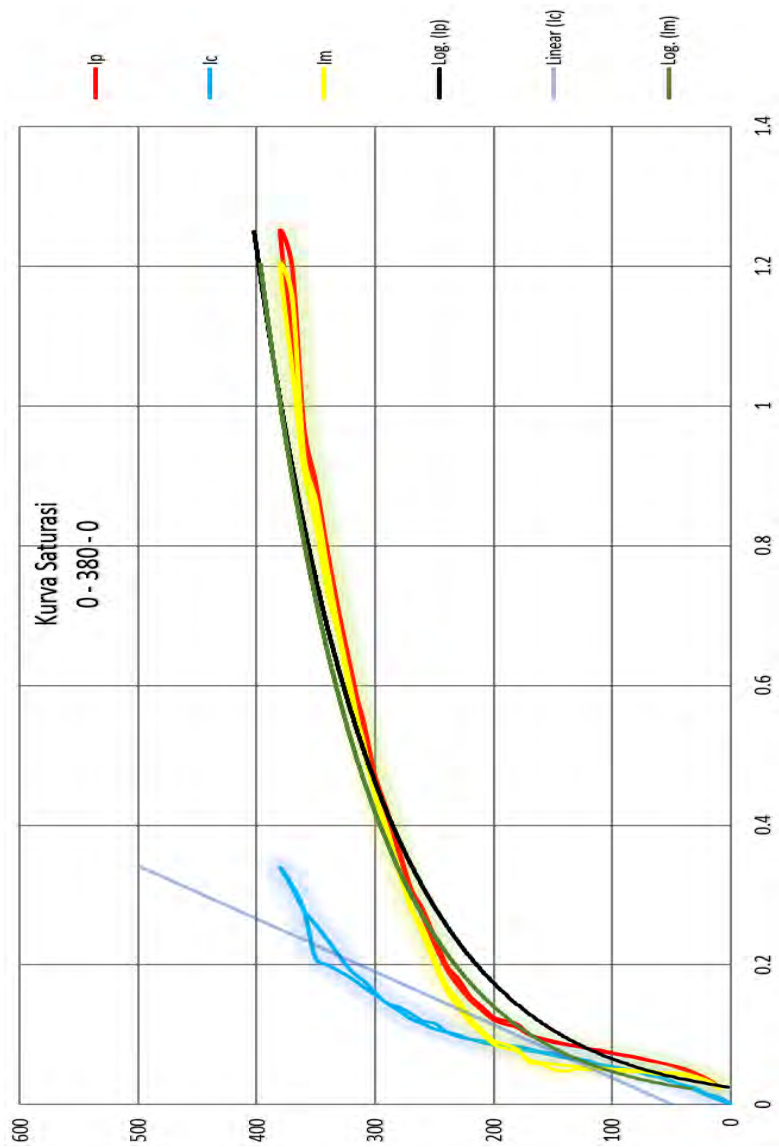
Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen transformator penelitian

Berdasarkan diagram pada gambar 3.2, bisa kita dapatkan besarnya arus rugi – rugi dan arus magnetisasi sesuai dengan persamaan berikut,

$$I_c = I_p \cos \theta \quad (3.3)$$

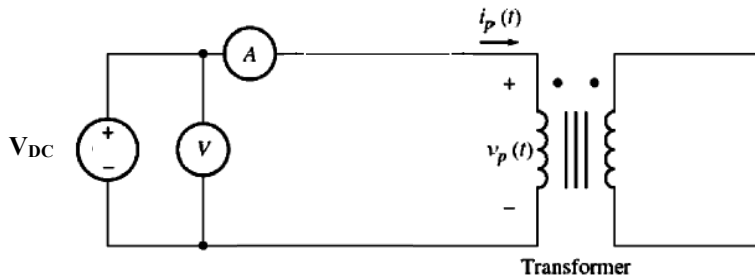
$$I_m = \sqrt{I_p^2 - I_c^2} \quad (3.4)$$

Sehingga, dari hasil pengukuran pada tabel 3.3 dan hasil perhitungan pada persamaan 3.3 dan 3.4, didapatkan plotting arus magnetisasi (I_m), arus rugi – rugi (I_c), dan arus eksitasi DC (I_p) terhadap tegangan di sisi primer (V_p) yang ditunjukkan oleh gambar 3.3. Kondisi saturasi ini terjadi pada sisi primer transformator satu fasa 1 kVA dengan model pemotongan inti normal. Kondisi saturasi yang dimaksud adalah saat nilai fluks pada inti besi transformator sudah mencapai nilai maksimum sehingga kurva arus eksitasi maupun arus magnetisasi terhadap tegangan di sisi primer akan membentuk “lutut” atau biasa disebut *knee point*. Sedangkan arus rugi – rugi akan naik secara linier mengikuti kenaikan tegangan pada sisi primer transformator. Pada poin tertentu, bentuk kurva perubahan arus magnetisasi dan arus eksitasi akan mengalami kondisi yang sama persis. Sehingga ditetapkan arus saturasi (I_p) sebesar 1,2 Ampere.



Gambar 3.3 Kurva kondisi saturasi pada transformator

3.2. Pengujian DC (DC Test)



Gambar 3.4 Rangkaian pengujian DC

Pengujian DC digunakan untuk mengetahui parameter resistansi belitan transformator. Skema pengujian DC untuk transformator dalam keadaan tanpa beban dapat dilihat melalui gambar 3.4. Cara pengujian DC untuk transformator satu fasa yaitu:

1. Menghubungkan sumber tegangan searah ke sisi primer transformator.
2. Pada sisi primer juga dihubungkan dengan alat ukur berupa voltmeter, dan amperemeter.
3. Pada sisi sekunder dibiarkan tanpa beban.
4. Naikkan tegangan suplai secara perlahan dan disetiap perubahan tegangan, dicatat nilai arus yang terbaca oleh amperemeter.
5. Setelah semua proses selesai, dihitung nilai resistansi dari hasil pembagian antara tegangan dan arus untuk kemudian didapatkan nilai rata – rata resistansi belitan transformator.

Setelah proses pengujian selesai dilakukan, maka didapatkan hasil pengukuran berupa tegangan, arus, dan daya pada sisi primer transformator. Berikut merupakan hasil dari pengujian hubung singkat yang telah dilakukan dan disajikan dalam bentuk tabel:

Tabel 3.2 Hasil pengujian hubung singkat pada transformator satu fasa

Tegangan (V)	Arus (A)	Resistansi (Ω)
2	1,05	1,9
3	1,58	1,9
4	2	2
5	2,5	2

Setelah mendapatkan nilai – nilai dari tabel 3.2, langkah selanjutnya adalah mendapatkan nilai resistansi rata – rata melalui perhitungan berikut ini,

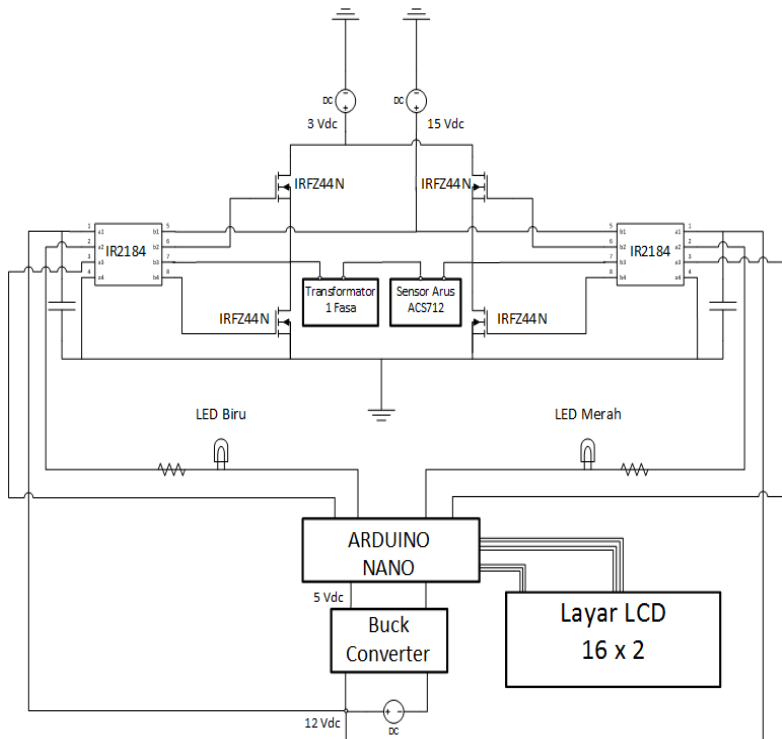
$$R = \frac{1,9+1,9+2+2}{4} \quad (3.5)$$

$$R = 1,95 \, \Omega \quad (3.6)$$

Sehingga didapatkan parameter resistansi belitan inti transformator satu fasa yaitu 1,95 Ω seperti yang terlihat pada persamaan 3.6.

3.3. Perancangan Alat Demagnetisasi Arus *Inrush* dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah

Proses demagnetisasi arus *inrush* merupakan hal yang sangat krusial pada penelitian tugas akhir kali ini. Lonjakan arus yang sangat tinggi di awal proses energisasi transformator memang dapat berdampak buruk bagi sistem proteksi maupun terhadap *lifetime* transformator itu sendiri. Seperti yang dibahas pada bab sebelumnya, saat transformator pertama kali dihubungkan ke sumber tegangan bolak - balik, maka akan muncul aliran arus magnetisasi yang mengalir melalui kumparan primer dari transformator. Arus tersebut digunakan untuk proses energisasi yaitu agar muncul fluks pada inti ferromagnetik. Arus magnetik pada awal proses energisasi biasanya memiliki nilai hingga 8 hingga 12 kali lebih besar dari arus beban penuh transformator [8]. Oleh karena itu, diperlukan adanya sebuah alat yang dapat mengurangi besarnya arus *inrush*. Alat demagnetisasi ini dirancang sedemikian rupa agar mudah saat digunakan dan mampu mengurangi besarnya nilai puncak arus *inrush* pada ketika dilakukan proses energisasi.



Gambar 3.5 Rancangan alat demagnetisasi

Sebuah demagnetizer yang dibuat ini bekerja berdasarkan prinsip kerja rangkaian *fullbridge* inverter yang menggunakan 4 buah MOSFET sebagai saklar semikonduktornya. Alat demagnetisasi ini akan mendapatkan *input* atau masukan sumber tegangan dan arus searah yang nantinya diubah menjadi gelombang bolak balik berbentuk kotak. Jika dilihat pada gambar 2.5 pada bab 2, sumber tegangan DC yang diinjeksi ke inti transformator mengakibatkan kenaikan arus secara linier. Alat demagnetisasi yang digunakan untuk mengurangi fluks sisa pada inti transformator merupakan sebuah rangkaian *fullbridge inverter* yang menggunakan suplai tegangan DC dan menghasilkan gelombang AC berbentuk kotak. Skema rangkaian yang digunakan sama dengan gambar

3.5 dimana terdapat 3 bagian utama yaitu MOSFET dan *gate drivernya*, sensor arus, serta sebuah kontroler.

Pencarian nilai arus mencapai kondisi saturasi dilakukan pada saat melakukan uji hubung terbuka yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Dari hasil pengujian tersebut ditetapkan arus magnetisasi (I_m) mengalami kondisi saturasi saat bernilai 1,16 ampere. Saat itu arus eksitasi DC (I_p) berada pada nilai 1,2 ampere. Modul ACS hanya dapat mengukur besarnya arus eksitasi yang masuk ke sisi primer transformator, sehingga pembacaan arus saturasi pada modul ACS ditetapkan sebesar 1,2 ampere agar kemudian diteruskan menuju modul mikrokontroler sebagai sinyal untuk melakukan proses pensaklaran. Persamaan yang digunakan untuk menentukan pembacaan arus saturasi yang dilakukan oleh sensor arus ACS 712 adalah,

$$V_{analog} = (I_{sat} \times Sensitivity) + V_{offset} \quad (3.7)$$

dimana:

V_{analog} = tegangan analog dari pembacaan ACS (mV)

I_{sat} = arus saturasi yang ditetapkan (A)

$Sensitivity$ = sensitivitas ACS712 (mV/A)

V_{offset} = tegangan offset dari hasil kalibrasi 0 ampere (mV)

Setelah mendapatkan tegangan analog dari pembacaan sensor arus, langkah selanjutnya adalah mengubah tegangan analog tadi menjadi bentuk digital melalui persamaan berikut ini,

$$V_{digital} = \frac{V_{analog}}{5000} 1024 \quad (3.8)$$

Dengan ketentuan:

$V_{digital}$ = tegangan digital dari konversi tegangan analog (mV)

5000 = V_{cc} 5 volt pada mikrokontroler (mV)

1024 = jumlah bit maksimal pada mikrokontroler

Dari persamaan 3.7 dan 3.8 akan didapatkan arus saturasi positif yang dibaca oleh mikrokontroler:

$$V_{analog} = (1,2 \times 100) + 2509 = 2629 \text{ mV} \quad (3.9)$$

$$V_{digital} = \frac{2629}{5000} 1024 = 538 \text{ mV} \quad (3.10)$$

Dari persamaan yang sama juga akan didapatkan arus saturasi negatif yang dibaca oleh mikrokontroler:

$$V_{analog} = 2509 - (1,2 \times 100) = 2389 \text{ mV} \quad (3.11)$$

$$V_{digital} = \frac{2389}{5000} 1024 = 489 \text{ mV} \quad (3.12)$$

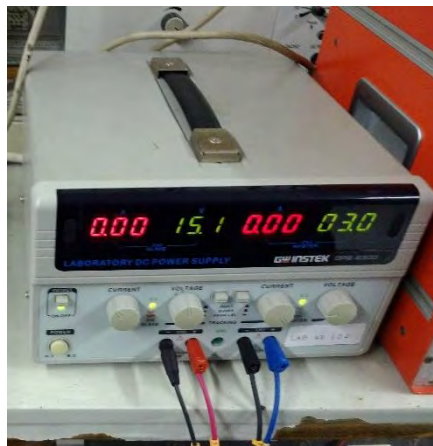
Hasil konversi arus analog menjadi tegangan digital ini dimasukkan ke dalam program mikrokontroler sebagai tolak ukur kondisi saturasi pada arus magnetisasi agar mikrokontroler melakukan proses pensaklaran dan merubah polaritas tegangan output positif menjadi negatif serta sebaliknya.

Alat demagnetisasi arus *inrush* pada transformator satu fasa ini menggunakan 3 buah sumber DC. Sumber DC yang pertama, gambar 3.6, digunakan untuk mensuplai *gate driver* IR2184 yang membutuhkan tegangan antara 10 Vdc hingga 20 Vdc. Pada prakteknya, sumber tegangan DC yang digunakan untuk mensuplai IR2184 sebesar 12 Vdc. Selain itu, tegangan 12 Vdc ini juga digunakan sebagai suplai yang langsung terhubung dengan *buck converter* yang langsung menurunkan tegangan tersebut menjadi 5 Vdc untuk kemudian di salurkan ke mikrokontroler.



Gambar 3.6 Sumber DC 1

Sumber tegangan DC yang kedua, gambar 3.7 memiliki 2 panel dimana panel bagian kanan digunakan sebagai suplai utama rangkaian demagnetisasi yaitu sebesar 3 Vdc dan panel sebelah kiri digunakan untuk mensuplai pin V_B pada IR2184 dengan nilai 15 Vdc. Kedua panel tersebut, yaitu antara panel kiri dan panel kanan bekerja secara independen sehingga tidak saling terhubung satu sama lain. Untuk suplai arus searah pada sumber DC tersebut menyesuaikan dengan besar tegangan yang digunakan. Sesuai dengan hasil pengujian dan pengukuran, besarnya resistansi pada transformator adalah sekitar 2Ω . Sehingga apabila kita menggunakan 3 Vdc sebagai tegangan utama yang mensuplai transformator, maka arus yang diinjeksikan besarnya sekitar 1.2 Ampere. Sedangkan untuk suplai DC menuju pin V_B dan IR2184 tidak memerlukan suplai arus yang besar karena resistansi komponen tersebut nilainya sangat besar.



Gambar 3.7 Sumber DC 2

Nilai 15 Vdc merupakan hasil dari $V_s + 12 \text{ Vdc}$ yang mana rumus tersebut menyesuaikan dengan parameter yang ada pada *datasheet* komponen. Suplai utama sebesar 3 Vdc didapatkan sesuai dengan persamaan berikut,

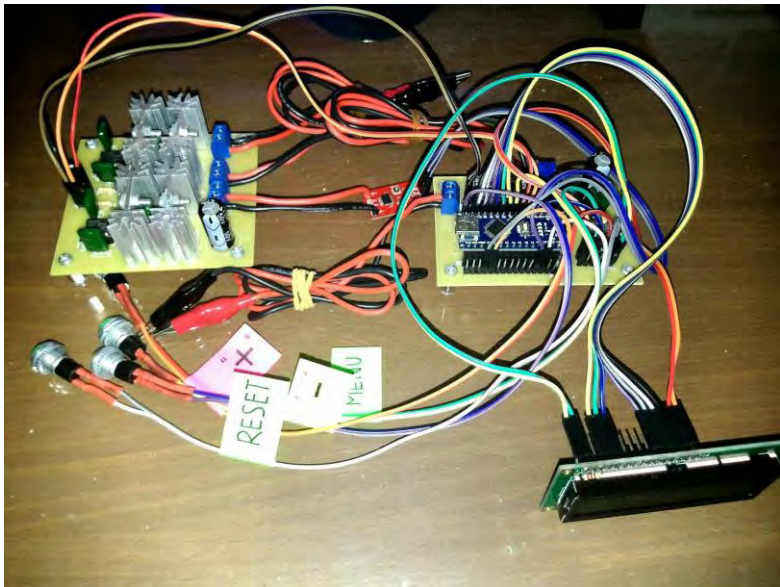
$$V_{dc} = (I \times R) + (2 \times r_d \times I) \quad (3.7)$$

Berdasarkan pengujian, didapatkan resistansi pada transformator sebesar $1,95 \, \Omega$, r_d pada MOSFET $17,5 \, m\Omega$ dan arus saturasi sebesar $1,2 \, A$. Sehingga didapatkan tegangan suplai maksimal adalah,

$$V_{dc} = (1,2 \times 1,95) + (2 \times 0,0175 \times 1,2) \quad (3.13)$$

$$V_{dc} = 2,4 \, Volt \quad (3.14)$$

Namun pada proses perancangan dan percobaan, terjadi penurunan nilai tegangan. Sehingga arus yang disuplai tidak mencapai $1,2$ ampere. Oleh karena itu, nilai tegangan suplai utama dari rangkaian demagnetisasi ini dinaikkan menjadi $3 \, Volt$.



Gambar 3.8 Alat demagnetisasi

Alat demagnetisasi ini dipisah menjadi 2 bagian yaitu bagian pensaklaran dan bagian kontrol. Sehingga diperlukan 2 buah sumber tegangan DC sebagai suplai utama dan yang satu lagi sebagai *input*

switching. Prinsip kerja dari alat demagnetisasi [1], [2] yang ditunjukkan gambar 3.8 yaitu:

1. Sumber tegangan DC dimasukkan ke bagian 1 yaitu bagian *switching* yang berisikan 4 buah MOSFET, 2 buah *halfbridge driver* dan beberapa komponen pendukung seperti LED, resistor, dan kapasitor. Tegangan masukan utama sebesar 3 volt DC, sedangkan tegangan masukan untuk pin Vb pada *gate driver* sebesar 15 volt DC.
2. Bagian 2 yaitu kontroller yang berisikan sebuah modul *buck converter*, modul mikrokontroller arduino nano, dan beberapa komponen tambahan berupa resistor, kapasitor, LED, *push button*, serta layar LCD 16 x 2 juga diinjeksi dengan sumber tegangan DC untuk *input vcc* pada *gate driver* dan modul mikrokontroller. Besar tegangan *input vcc* pada *gate driver* ini nilainya ditetapkan sebesar 12 volt DC. Namun sebelum menuju modul mikrokontroller, tegangan *input* 12 volt DC dari sumber tadi dikonversi menjadi 5 volt DC oleh modul *buck converter*.
3. Selanjutnya mikrokontroller diatur agar dapat menghasilkan pulsa PWM yang nantinya masuk ke dalam *gate driver* pada bagian pensaklaran untuk menyalakan MOSFET secara bergantian.
4. Saklar 1 dan saklar 2 menyala saat tegangan DC polaritas positif disalurkan ke transformator. Kemudian arus eksitasi DC akan naik secara linier dan kenaikan arus eksitasi hingga mencapai titik saturasi positif, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.12, dibaca oleh sensor arus.
5. Ketika arus magnetisasi sudah mengalami kondisi saturasi yaitu pada titik a, maka sensor arus tadi akan memberikan sinyal kepada mikrokontroller sehingga saklar 1 dan saklar 2 mati, berganti saklar 3 dan 4 yang menyala, sehingga polaritas tegangan suplai DC berganti ke polaritas negatif.
6. Arus magnetisasi kembali mengalami kondisi saturasi negatif pada titik c, sensor arus kembali memberikan sinyal kepada mikrokontroller agar kembali membalik polaritas tegangan suplai DC.
7. Dari titik c ke titik e inilah proses demagnetisasi berlangsung. Periode pensaklaran atau perubahan polaritas negatif menuju positif berlangsung dengan durasi setengah periode dari titik b ke c.

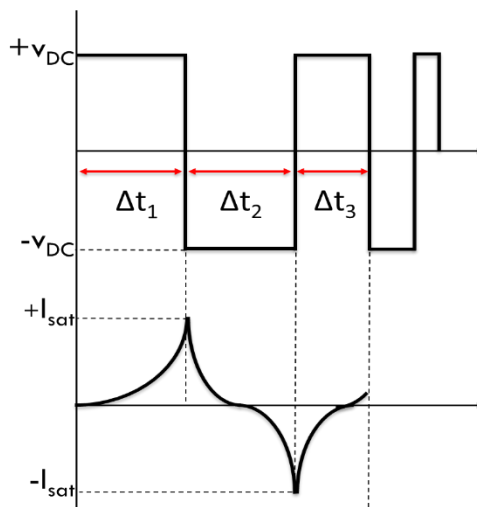
8. Durasi pensaklaran selanjutnya baik dari polaritas positif menuju ke negatif maupun dari polaritas negatif ke positif akan terus berkurang setengah dari gelombang sebelumnya.

Proses pensaklaran dimulai dengan frekuensi yang sangat rendah karena untuk mencapai kondisi saturasi diperlukan waktu yang cukup lama. Lamanya kondisi saturasi pada tiap transformator berbeda – beda karena hal itu berhubungan dengan tingkat kualitas inti besi transformator yang digunakan. Namun saat proses demagnetisasi berlangsung, frekuensi sumber tegangan tadi akan meningkat dan mengakibatkan proses pensaklaran menjadi semakin cepat. Oleh karena itu, alat demagnetisasi ini dinamakan alat demagnetisasi transformator satu fasa 1 kVA dengan sumber tenaga berfrekuensi sangat rendah. Dari prinsip kerja alat demagnetisasi yang telah dijelaskan diatas, didapatkan persamaan periode pensaklaran berikut ini,

$$\Delta t_x = \frac{\Delta t_{x-1}}{2} \quad (3.10)$$

dimana:

$x = 3, 4, 5, \dots$



Gambar 3.9 Metode pensaklaran alat demagnetisasi

3.4. Pembacaan Arus *Inrush* Menggunakan *Data Acquisition* dan Pengolahan Data Menggunakan Perangkat Lunak

Data Acquisition atau DAQ merupakan sebuah alat yang dibuat oleh National Instruments untuk mengukur dan membaca arus serta tegangan. DAQ yang digunakan untuk melakukan pengukuran nilai arus dan tegangan pada saat melakukan pengujian adalah DAQ 9246 dan DAQ 9223. DAQ 9246 yang terhubung seri dengan transformator ini berfungsi untuk merekam nilai arus yang masuk menuju transformator. Untuk melakukan tugasnya itu, DAQ 9246 dibantu oleh transformator arus sebagai sensor arus yang berfungsi untuk membaca nilai arus yang mengalir. Selain itu transformator arus tersebut juga digunakan sebagai sistem pengamanan DAQ 9246 dari gangguan arus lebih.



Gambar 3.10 DAQ 9246

Proses pembacaan tegangan yang disuplai dari sumber tegangan jala – jala 20 Volt dilakukan oleh DAQ 9223 yang terhubung secara parallel dengan transformator dilakukan secara *realtime*. Pembacaan tegangan ini dilakukan untuk menentukan posisi fasa yang masuk ke transformator saat melakukan proses energisasi. Posisi fasa tegangan masukan berpengaruh cukup besar terhadap besarnya arus *inrush*. Saat tegangan masukan AC memiliki sudut fasa 0° , maka nilai arus *inrush* akan sangat besar hingga 8 kali lipat dari arus nominal transformator.

Setelah selesai melakukan proses pembacaan arus menggunakan DAQ 9246 dan pembacaan tegangan menggunakan DAQ 9223, maka proses selanjutnya adalah pengolahan data menggunakan perangkat lunak *NIDAde*m dan juga *LabView* sebagai *human interface*. Setelah dilakukan pengolahan data pada komputer, nanti dapat dilihat perbandingan besarnya arus *inrush* dengan sudut penyalan tegangan jala – jala PLN.



Gambar 3.11 DAQ 9223

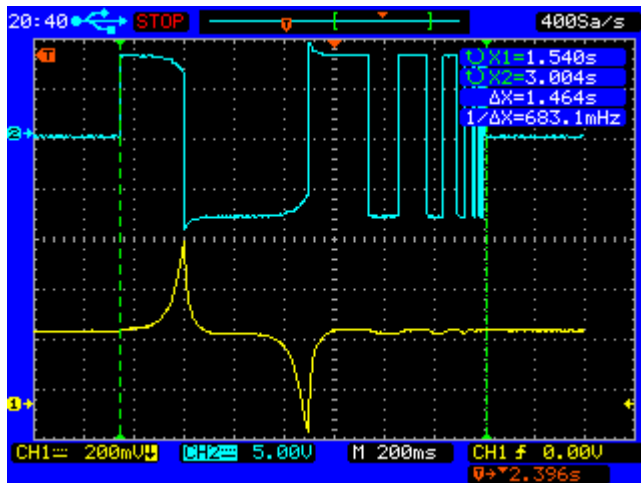
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN ALAT DEMAGNETISASI ARUS INRUSH DENGAN SUMBER TENAGA BERFREKUENSI SANGAT RENDAH DAN ANALISA DATA

4.1. Pengujian Alat Demagnetisasi

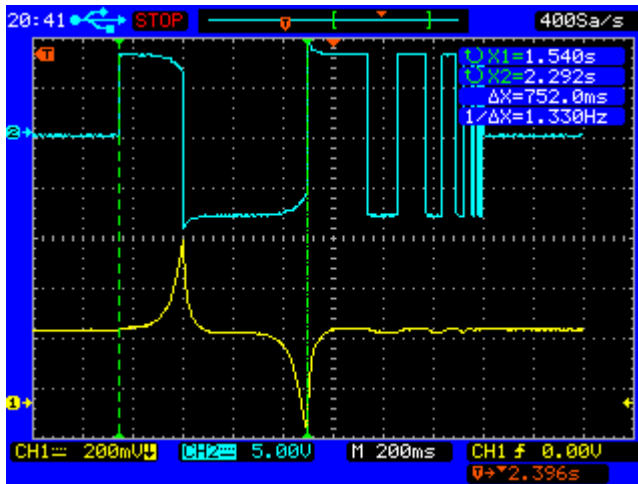
Alat demagnetisasi yang telah dirancang dan telah dijelaskan pada bab 3, diuji di laboratorium untuk dianalisa apakah bisa menghasilkan gelombang kotak sinus seperti yang diharapkan. Seperti yang dibahas sebelumnya, alat demagnetisasi arus *inrush* pada transformator 1 fasa 1 kVA ini berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* [1]. Hal itu menunjukkan bahwa aplikasi alat ini menggunakan sumber DC sebagai suplai utama yang diubah menjadi gelombang kotak AC dengan frekuensi yang bervariasi.



Gambar 4.1 Gelombang tegangan dan arus keluaran alat demagnetisasi

Dapat dilihat pada gambar 4.1, proses demagnetisasi hanya membutuhkan waktu sekitar 1,5 detik saja atau lebih tepatnya 1,46 detik. Hal ini tentunya merupakan proses yang sangat cepat dan arus eksitasi

DC yang masuk ke inti besi hamper mendekati 0 ampere di akhir proses tersebut.



Gambar 4.2 Frekuensi saturasi gelombang keluaran alat demagnetisasi

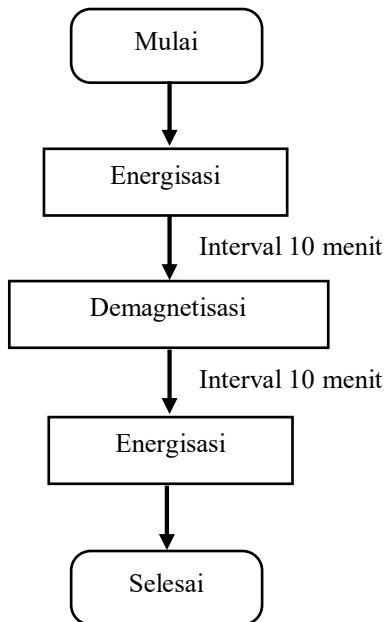
Sedangkan pada gambar 4.2 menunjukkan periode dari transformator mencapai kondisi saturasi saat diinjeksi dengan alat demagnetisasi. Terlihat bahwa untuk mencapai kondisi saturasi hanya membutuhkan waktu sekitar 0,7 detik. Frekuensinya sangat rendah yaitu 1,3 Hz. Pada setengah gelombang dengan polaritas positif, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, memiliki sinyal masukan sebesar 3 volt. Tetapi yang terbaca di osiloskop hanya 2,4 Vdc. Jika dianalisa, terjadi penurunan tegangan selama proses demagnetisasi berlangsung. Hal itu disebabkan oleh proses pensaklaran yang terjadi berulang kali dengan frekuensi yang semakin tinggi. Gambar 4.1 dan 4.2 memperlihatkan perubahan tegangan dari polaritas negatif menjadi polaritas positif maupun sebaliknya pada saat frekuensi rendah hingga cukup tinggi. Sehingga untuk menghindari penurunan tegangan akibat proses pensaklaran, alat demagnetisasi diprogram agar berhenti beroperasi saat periode setengah gelombang sudah mencapai 0,1 mili detik.

Jika mengacu pada kedua gambar tersebut, gambar 4.1 dan gambar 4.2, maka proses demagnetisasi sudah sesuai dengan yang telah dirancang sebelumnya. Kelemahan dari alat tersebut adalah tidak bisa

mempertahankan nilai tegangan masukan, sehingga pada gelombang keluaran terdapat penurunan nilai akibat proses pensaklaran. Sesuai yang disebutkan pada referensi [2], sebenarnya proses demagnetisasi dianggap sudah selesai dengan periode satu setengah gelombang. Untuk mengatasi hal itu, pada modul mikrokontroller di program agar menghentikan proses pensaklaran saat setengah gelombang yang terakhir memiliki periode lebih dari sama dengan 10 mili detik. Dengan begitu diharapkan proses demagnetisasi dapat berjalan optimal dan dapat mengurangi fluks sisa pada inti transformator sehingga nilai arus *inrush* saat di energisasi dapat berkurang secara signifikan.

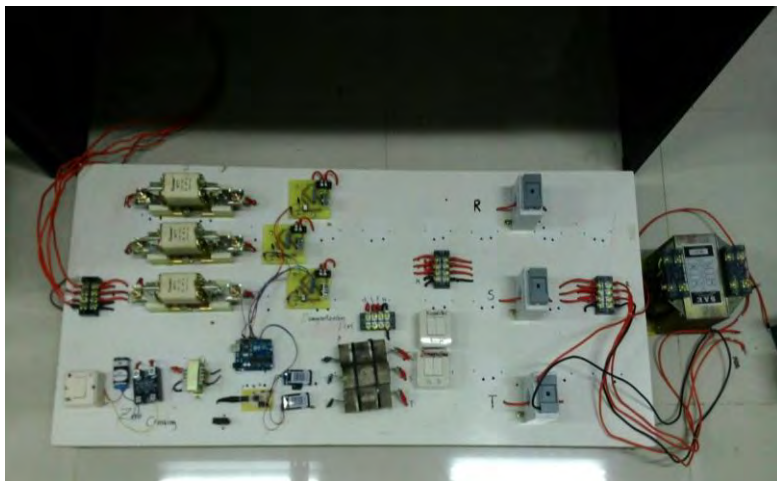
4.2. Pengujian Arus *Inrush*

Pengujian transformator satu fasa 1 kVA dilakukan di laboratorium tegangan tinggi untuk mencari nilai arus *inrush*nya. Diagram pada gambar 4.3 menunjukkan langkah – langkah pengujian transformator dan alat demagnetisasinya.



Gambar 4.3 Diagram proses pengujian arus *inrush*

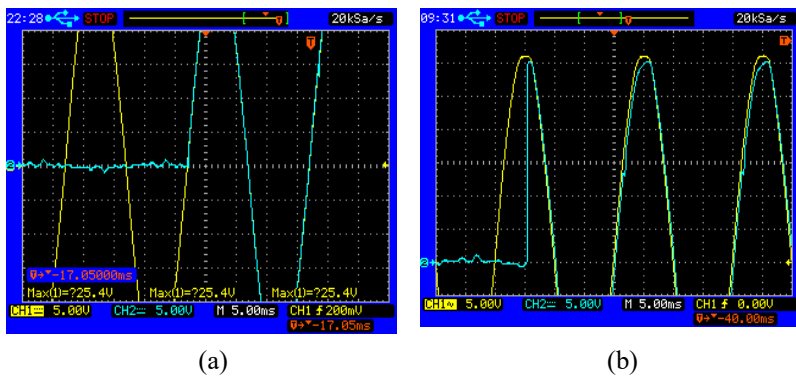
Transformator yang diuji kali ini diasumsikan memiliki fluks sisa di dalam inti besinya akibat pengujian yang dilakukan berulang – ulang saat mencari parameter rangkaian ekivalen transformator. Awalnya dilakukan proses energisasi menggunakan modul pensaklaran yang ditunjukkan oleh gambar 4.4. Modul pensaklaran ini berfungsi untuk menghubungkan transformator dengan tegangan sumber jala – jala 220 Volt. Terdapat 2 buah TRIAC yang berfungsi sebagai saklar utama. TRIAC ini diatur sudut penyalannya agar tegangan yang masuk ke transformator memiliki sudut penyalan 0° dan 90° . Sudut penyalan dari tegangan masukan ini dibutuhkan pada saat proses energisasi karena harus dilakukan pengukuran arus *inrush* di titik yang sama agar data yang didapatkan bisa dibandingkan satu sama lain.



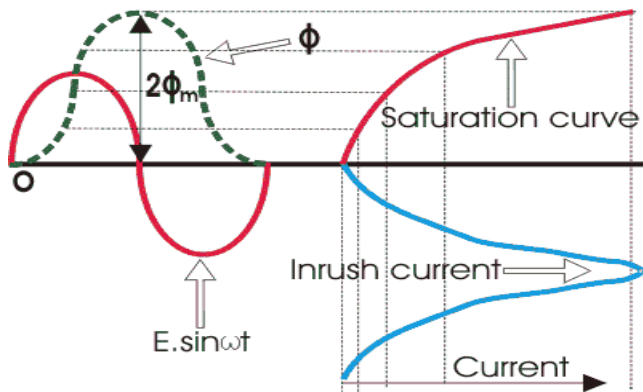
Gambar 4.4 Modul pensaklaran

Sebelum melakukan pengujian, perlu dilakukan kalibrasi terlebih dahulu pada modul pensaklaran. Gambar 4.5 menunjukkan proses kalibrasi antara tegangan masukan dari sumber PLN dengan tegangan keluaran dari modul demagnetisasi. Grafik berwarna biru merupakan tegangan keluaran dari modul pensaklaran yang masuk ke bagian primer transformator. Bagian (a) menunjukkan tegangan yang masuk pada transformator memiliki sudut penyalan sebesar 0° . Jika transformator diberi tegangan dengan sudut penyalan 0° atau biasa disebut *zero-*

crossing, maka nilai arus *inrush* akan mencapai nilai maksimalnya. Sedangkan gambar (b) merupakan kalibrasi modul pensaklaran dengan sudut penyalan 90° . Ketika diberi tegangan dengan sudut penyalan 90° , maka seharusnya nilai arus *inrush* pada transformator tidak terlalu besar nilainya. Hal ini terjadi karena fluks magnetisasi yang dibangkitkan belum mencapai kondisi saturasi. Berbeda halnya saat sudut penyalan 0° , fluks magnetisasi yang dibangkitkan bisa mencapai kondisi saturasi sehingga nilai arus *inrush*nya bisa sangat tinggi.

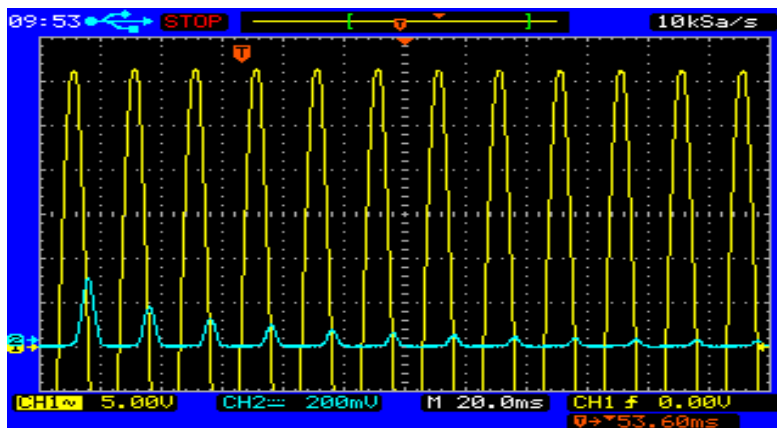


Gambar 4.5 Proses kalibrasi modul pensaklaran pada; 0° (a), dan 90° (b)



Gambar 4.6 Pengaruh fluks terhadap arus *inrush*

Gambar 4.6 menunjukkan teori nilai dari arus *inrush* dipengaruhi oleh sudut penyalan tegangan masukan dan besarnya fluks magnetisasi. Saat sudut penyalan tegangan masukan 0° , maka fluks magnetisasi yang muncul nilainya bisa mencapai 2 kali lipat lebih besar dari fluks magnetisasi normal. Hal itu disebabkan adanya fluks sisa di dalam inti transformator yang tidak bisa dihilangkan. Selain itu, setelah mencapai nilai maksimum, fluks magnetisasi tadi mengalami kondisi saturasi sehingga nilai arus *inrush* pada transformator nilainya berkali – kali lipat arus nominal transformator. Hal ini dibuktikan pada gambar 4.7 yang menunjukkan pengukuran arus *inrush* menggunakan osiloskop dengan sudut penyalan 0° . Pada gambar tersebut, arus *inrush* yang terukur sebesar 30 ampere.



Gambar 4.7 Pengaruh sudut penyalan tegangan masukan terhadap arus *inrush*

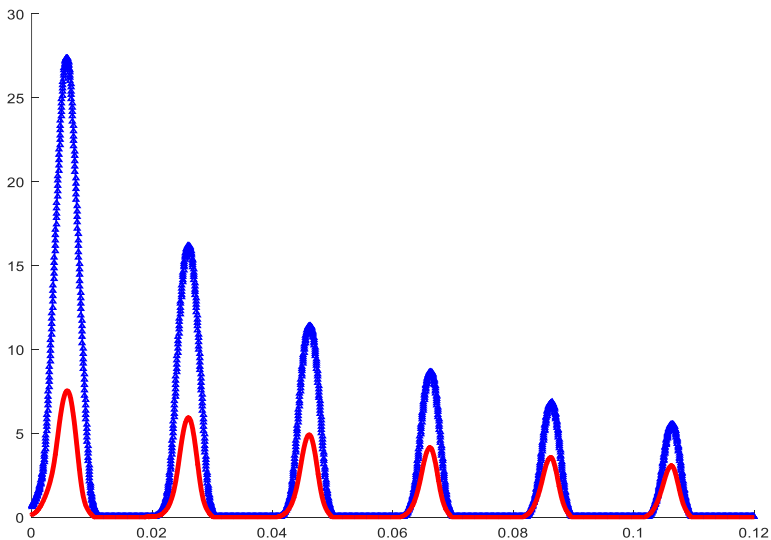
Setelah selesai melakukan proses energisasi dengan mengatur sudut penyalan tegangan masukan, proses selanjutnya adalah demagnetisasi pada transformator tersebut menggunakan alat demagnetisasi dengan sumber tenaga berfrekuensi sangat rendah. Pada tahap ini, transformator uji dibawa ke laboratorium konversi energi dengan interval waktu selama 10 menit. Durasi waktu untuk melakukan demagnetisasi antara percobaan 1 dengan percobaan selanjutnya berbeda – beda. Hal itu disebabkan oleh lamanya transformator mengalami kondisi saturasi. Proses demagnetisasi sendiri berlangsung saat

transformator tidak terhubung dengan sumber tegangan jala - jala dan dalam kondisi tidak berbeban.

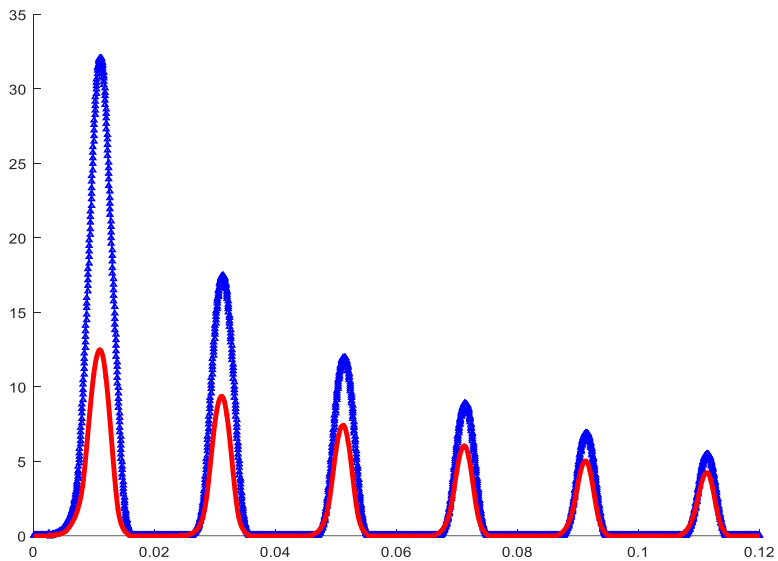
Proses yang terakhir adalah energisasi transformator di laboratorium tegangan tinggi dengan menggunakan modul pensaklaran dan sudut penyalan yang sama seperti saat proses energisasi yang pertama. Interval waktu selama 10 menit kembali diberlakukan karena perpindahan tempat pengujian. Dengan menggunakan sudut penyalan yang sama diantara 2 proses energisasi tersebut, maka arus *inrush* sebelum dan sesudah didemagnetisasi dapat dibandingkan dan dianalisa.

4.2.1. Perbandingan Arus *Inrush* Sudut Penyalan 0°

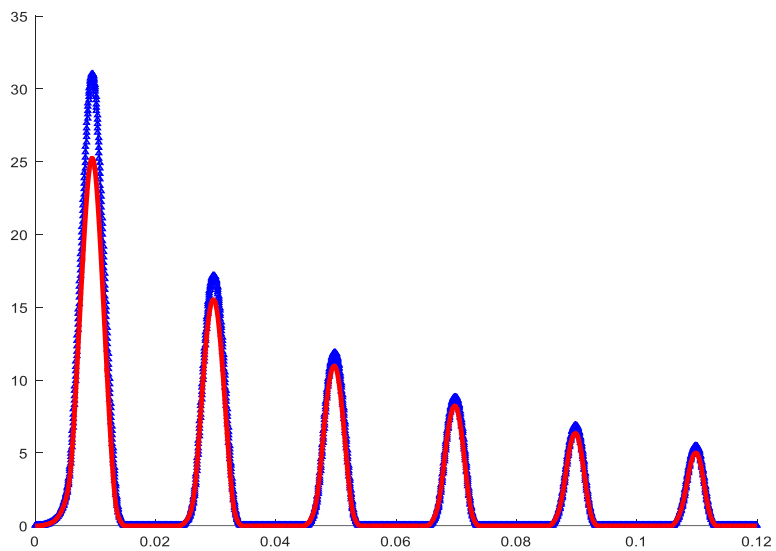
Proses pengujian dilakukan sebanyak 5 kali agar dapat dilakukan perbandingan durasi proses demagnetisasi dan besarnya arus *inrush* sebelum dan sesudah di demagnetisasi. Tahap – tahap pengujian dilakukan sesuai dengan diagram pada gambar 4.3 dan data diambil pada saat proses energisasi. Setelah mendapatkan ritme proses energisasi dan demagnetisasi, yaitu adanya interval waktu selama 10 menit, maka proses pengambilan data segera dilakukan. Kurva biru menunjukkan arus *inrush* sebelum demagnetisasi dan kurva merah menunjukkan arus *inrush* setelah demagnetisasi.



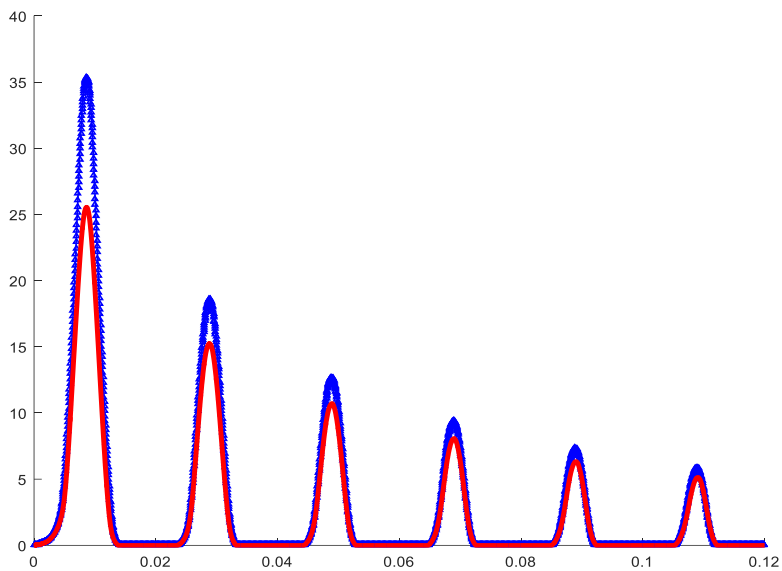
Gambar 4.8 Percobaan 1 arus *inrush* sudut penyalan 0°



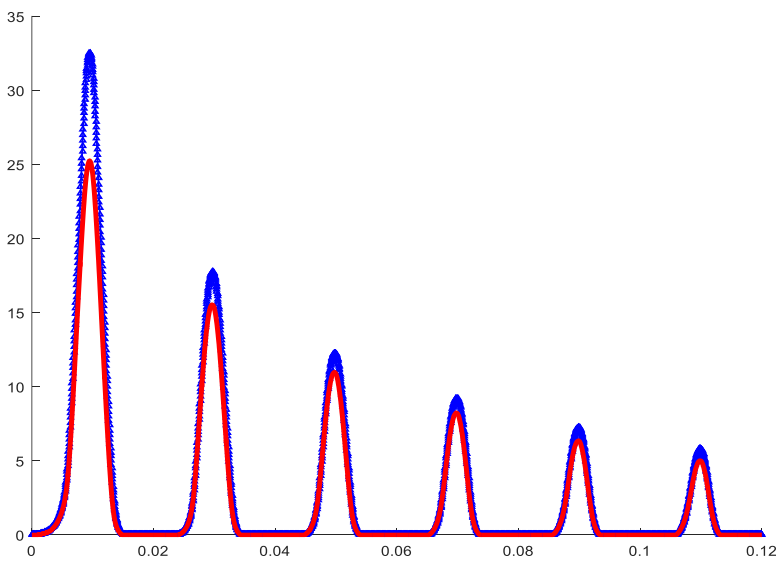
Gambar 4.9 Percobaan 2 arus *inrush* sudut penyalan 0°



Gambar 4.10 Percobaan 3 arus *inrush* sudut penyalan 0°



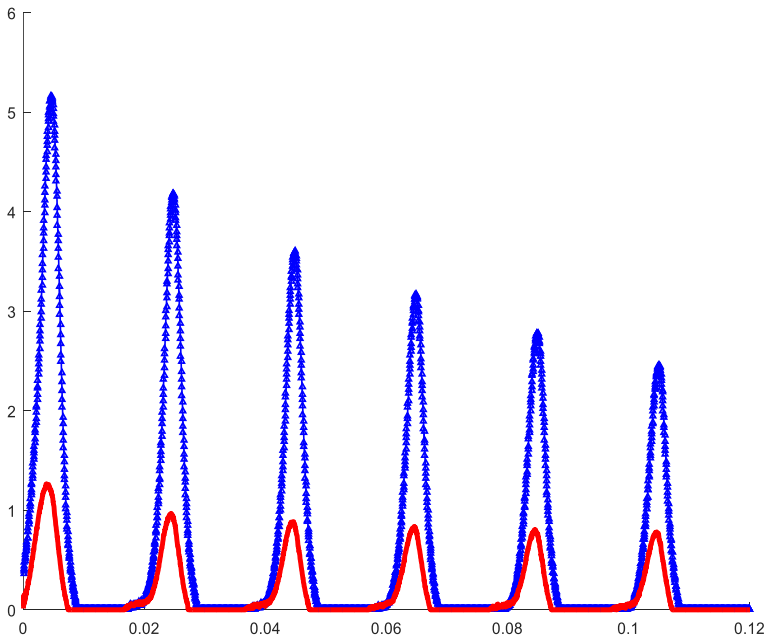
Gambar 4.11 Percobaan 4 arus *inrush* sudut penyalan 0°



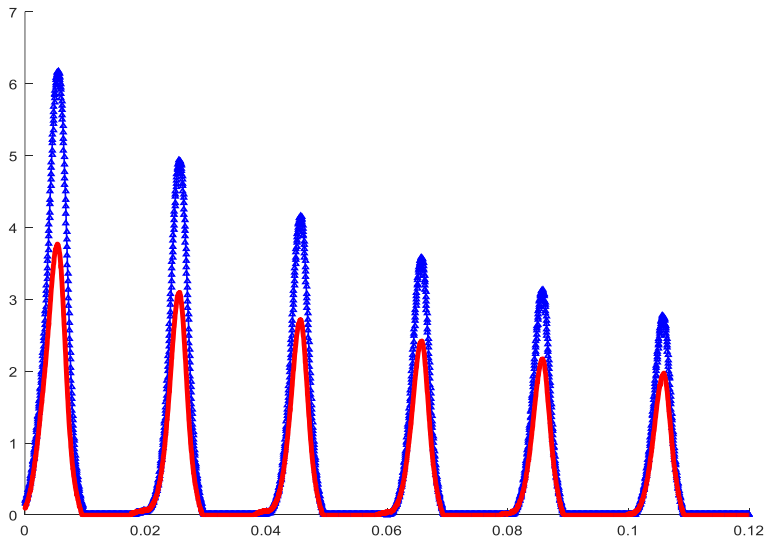
Gambar 4.12 Percobaan 5 arus *inrush* sudut penyalan 0°

4.2.2. Perbandingan Arus *Inrush* Sudut Penyalaan 90°

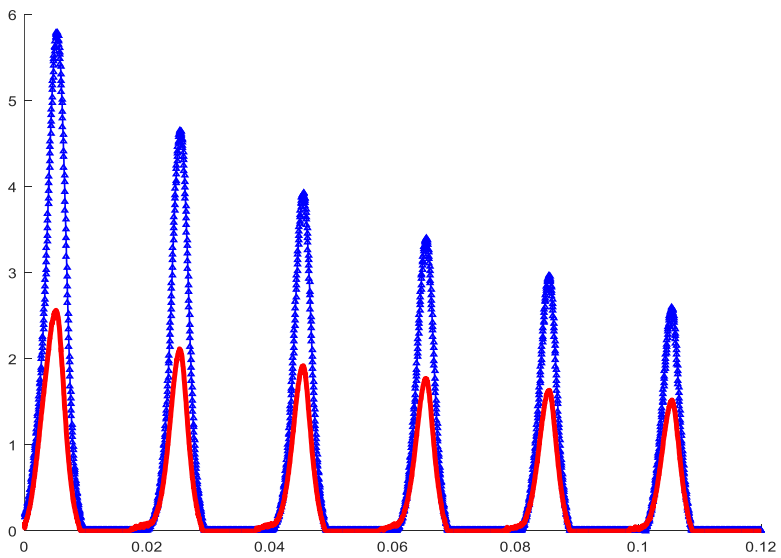
Proses pengujian dilakukan sebanyak 5 kali agar dapat dilakukan perbandingan durasi proses demagnetisasi dan besarnya arus *inrush* sebelum dan sesudah di demagnetisasi. Tahap – tahap pengujian dilakukan sesuai dengan diagram pada gambar 4.3 dan data diambil pada saat proses energisasi. Setelah mendapatkan ritme proses energisasi dan demagnetisasi, yaitu adanya interval waktu selama 10 menit, maka proses pengambilan data segera dilakukan. Kurva biru menunjukkan arus *inrush* sebelum demagnetisasi dan kurva merah menunjukkan arus *inrush* setelah demagnetisasi.



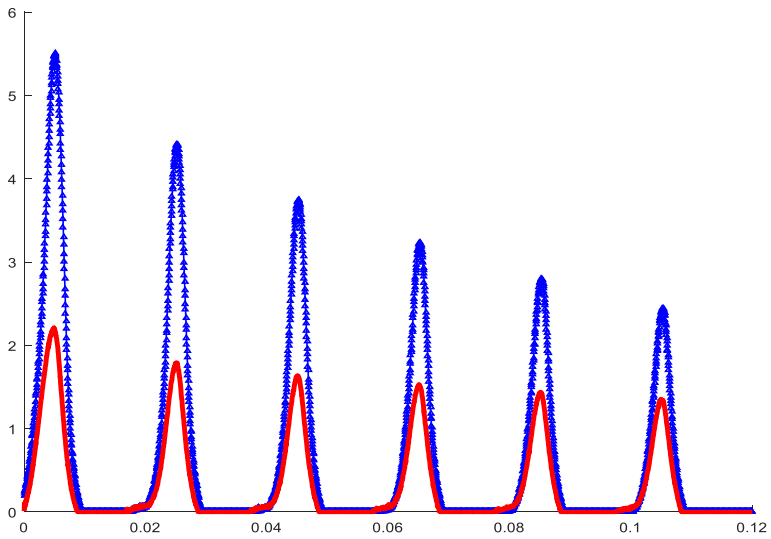
Gambar 4.13 Percobaan 1 arus *inrush* sudut penyalan 90°



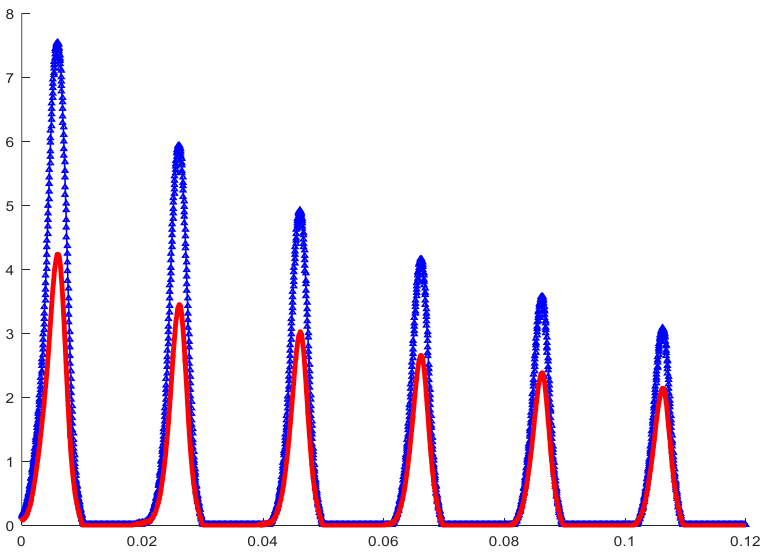
Gambar 4.14 Percobaan 2 arus *inrush* sudut penyalan 90°



Gambar 4.15 Percobaan 3 arus *inrush* sudut penyalan 90°



Gambar 4.16 Percobaan 4 arus *inrush* sudut penyalan 90°



Gambar 4.17 Percobaan 5 arus *inrush* sudut penyalan 90°

4.3. Analisa Data

Setelah dilakukan pengujian energisasi dan demagnetisasi, dilakukan pengukuran menggunakan modul DAQ dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik pada layar monitor. Dari hasil pengujian dan pengukuran nilai arus *inrush* sebelum dan sesudah didemagnetisasi, didapatkan data sebagai berikut

Tabel 4.1 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 0°

Sudut (°)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Interval (menit)	Demagnetisasi (detik)	Interval (menit)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Turun (%)
0	27,4	10	1,46	10	7,6	72,3
0	32	10	1,46	10	12,5	61
0	31	10	1,46	10	25	19,3
0	35,3	10	1,46	10	25,5	27,8
0	32,5	10	1,46	10	25	23,1

Data pada tabel 4.1 menunjukkan penurunan arus *inrush* pada saat dilakukan pengujian sebelum dan sesudah demagnetisasi. Data tersebut dapat dianalisa bahwa rata – rata proses demagnetisasi menghabiskan waktu sekitar 1,5 detik. Tentu saja hal itu merupakan proses yang cukup cepat mengingat pada alat demagnetisasi di program akan berhenti beroperasi saat periode setengah gelombang yang terakhir adalah 0,1 milidetik. Sedangkan untuk penurunan arus memiliki nilai yang berbeda – beda di setiap percobaan. Pada percobaan pertama dan kedua, didapatkan penurunan yang sangat signifikan sebesar 72,3% dan 61%. Tetapi pada percobaan ketiga hingga percobaan kelima, penurunan arus tidak terlalu signifikan, yaitu 19,3%, 27,8%, dan 23,1%. Perbedaan yang cukup mencolok tersebut disebabkan oleh jumlah fluks sisa yang terkumpul pada inti besi transformator. Semakin sering dienergisasi, maka fluks sisa juga semakin banyak. Akibatnya proses demagnetisasi menggunakan alat demagnetisasi arus *inrush* dengan sumber tenaga berfrekuensi sangat rendah hanya mampu mengurangi fluks sisa tidak sampai 30% dari fluks sisa keseluruhan. Meskipun begitu, nilai maksimal dari arus *inrush* saat dienergisasi tetap berkurang.

Selanjutnya data yang dianalisa adalah penurunan arus *inrush* saat menggunakan sudut penyalan 90°. Arus *inrush* yang dihasilkan tidak sebesar saat menggunakan sudut penyalan 0°. Hal itu sesuai dengan teori

yang telah disebutkan pada referensi [7] tentang pengaruh perbedaan sudut penyalan sumber tegangan AC terhadap arus *inrush*.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran arus *inrush* sudut penyalan 90°

Sudut (°)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Interval (menit)	Demagnetisasi (detik)	Interval (menit)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Turun (%)
90	5,2	10	1,46	10	1,26	75,8
90	6,2	10	1,46	10	4	35,5
90	5,8	10	1,46	10	2,5	57
90	5,5	10	1,46	10	2,2	60
90	7,5	10	1,46	10	4,2	44

Data pada tabel 4.2 menunjukkan penurunan arus *inrush* pada saat dilakukan pengujian sebelum dan sesudah demagnetisasi. Data tersebut dapat dianalisa bahwa rata – rata proses demagnetisasi menghabiskan waktu sekitar 1,46 detik. Tentu saja hal itu merupakan proses yang cukup cepat mengingat pada alat demagnetisasi di program akan berhenti beroperasi saat periode setengah gelombang yang terakhir adalah 10 milidetik. Sedangkan untuk penurunan arus memiliki nilai yang berbeda – beda di setiap percobaan. Pada percobaan pertama, didapatkan penurunan yang sangat signifikan sebesar 75,8%. Tetapi pada percobaan kedua, penurunan arus tidak terlalu signifikan, yaitu 35,5%. Perbedaan yang cukup mencolok tersebut disebabkan oleh jumlah fluks sisa yang terkumpul pada inti besi transformator. Semakin sering dienergisasi, maka fluks sisa juga semakin banyak. Akibatnya proses demagnetisasi menggunakan alat demagnetisasi arus *inrush* dengan sumber tenaga berfrekuensi sangat rendah hanya mampu mengurangi fluks sisa tidak sampai 30% dari fluks sisa keseluruhan. Meskipun begitu, pada percobaan ketiga hingga kelima, penurunan arus *inrush* cukup besar yaitu 57%, 60%, dan 44%. Berkurangnya nilai maksimal arus *inrush* tersebut dapat digunakan sebagai pertimbangan saat melakukan pengaturan koordinasi proteksi transformator.

Sebagai perbandingan, metode demagnetisasi *Variable Frequency – Constant Voltage* dibandingkan dengan metode demagnetisasi arus *inrush* yang lain yaitu menggunakan *Variable Voltage – Constant Frequency* (VVCF). Topik ini dikerjakan oleh salah satu rekan tugas akhir dan data yang didapatkan ditunjukkan oleh tabel berikut,

Tabel 4.3 Hasil demagnetisasi arus *inrush* menggunakan metode VVCF

Sudut (°)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Interval (menit)	Demagnetisasi (detik)	Interval (menit)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Turun (%)
0	32	10	2,66	10	25,5	20,3
0	30,78	10	2,66	10	25,05	18,6
90	9,22	10	2,66	10	5,78	37,3
90	8,22	10	2,66	10	5,5	33,1

Data yang didapatkan pada tabel 4.3 dibandingkan dengan data pada tabel 4.1 dan 4.2 dan jika dianalisa, terdapat perbedaan yang sangat signifikan mengenai waktu yang dibutuhkan dalam proses demagnetisasi. Metode VFCV dapat melakukan proses demagnetisasi lebih cepat daripada metode VVCF [1]. Hal ini terjadi karena perbedaan metode yang digunakan saat merancang alat dimana metode VFCV yang dibahas pada tugas akhir kali ini dirancang sedemikian rupa agar berhenti bekerja saat setengah gelombang terakhir dari tegangan keluaran memiliki periode 0,1 milidetik. Sedangkan untuk metode VVCF dirancang agar berhenti bekerja saat sudah mencapai satu setengah gelombang saja. Seharusnya alat demagnetisasi berbasis metode VFCV bekerja lebih lama tetapi tetap saja hasil pengujian menunjukkan bahwa alat demagnetisasi yang menggunakan metode VFCV membutuhkan waktu yang singkat. Namun untuk hasil demagnetisasi yang ditunjukkan oleh persentase penurunan pada kolom paling kanan di tabel 4.3 tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan metode VFCV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa alat demagnetisasi arus *inrush* dengan sumber tenaga berfrekuensi sangat rendah berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* memerlukan waktu sedikit lebih cepat dalam melakukan proses demagnetisasi, tetapi hasil yang didapatkan sangat optimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Tabel 5.1 Hasil pengujian kondisi saturasi pada transformator satu fasa

Vp (V)	Vs (V)	Pp (W)	PF	Θ (°)	Ip (A)	Ic (A)	Im (A)
0	0	0	0	0	0	0	0
10	6	0,06	0,24	76,11	0,025	0,006	0,02426
20	11,5	0,25	0,3378	70,25	0,037	0,0125	0,03482
30	17,5	0,6	0,4444	63,61	0,045	0,02	0,04031
40	23,5	1,1	0,5288	58,07	0,052	0,0275	0,04413
50	28,5	1,6	0,5714	55,15	0,056	0,032	0,04595
60	35	2,3	0,6388	50,29	0,06	0,03833	0,04615
70	40	2,9	0,6473	49,66	0,064	0,04142	0,04878
80	46	3,8	0,6985	45,69	0,068	0,0475	0,04865
90	52	4,5	0,7042	45,23	0,071	0,05	0,05040
100	58	5,4	0,7297	43,13	0,074	0,054	0,05059
110	63	6,3	0,7342	42,75	0,078	0,05727	0,05295
120	68,5	7,2	0,75	41,40	0,08	0,06	0,05291
130	75	8,3	0,7600	40,52	0,084	0,06384	0,05458
140	80	9,3	0,7635	40,22	0,087	0,06642	0,05618
150	86	10,5	0,7692	39,71	0,091	0,07	0,05814
160	91	11,8	0,7763	39,07	0,095	0,07375	0,05988
170	98	13	0,7647	40,11	0,1	0,07647	0,06443
180	105	14,3	0,7222	43,76	0,11	0,07944	0,07608
190	110	15,6	0,7139	44,44	0,115	0,08210	0,08052
200	115	16,9	0,7004	45,53	0,121	0,08475	0,08636
210	120	18,6	0,6560	48,99	0,135	0,08857	0,10188
220	127	20,5	0,6212	51,59	0,15	0,09318	0,11754
230	135	22,3	0,5703	55,22	0,17	0,09695	0,13964
240	140	24,8	0,5299	58,00	0,195	0,10333	0,16536

Tabel 5.1 Hasil pengujian kondisi saturasi pada transformator satu fasa (lanjutan)

250	145	27	0,4695	61,99	0,23	0,108	0,20306
260	150	30	0,4273	64,70	0,27	0,11538	0,24410
270	155	33	0,3942	66,77	0,31	0,12222	0,28488
280	160	37,5	0,3720	68,15	0,36	0,13392	0,33416
290	165	42	0,3448	69,82	0,42	0,14482	0,39423
300	170	47	0,3333	70,52	0,47	0,15666	0,44312
310	176	52,1	0,3112	71,86	0,54	0,16806	0,51318
320	181	57,8	0,2913	73,06	0,62	0,18062	0,59310
330	190	62,8	0,2718	74,22	0,7	0,19030	0,67363
340	195	67,9	0,2527	75,35	0,79	0,19970	0,76434
350	200	72,9	0,2340	76,46	0,89	0,20828	0,86528
360	205	100	0,2863	73,35	0,97	0,27777	0,92937
370	210	116	0,2612	74,85	1,2	0,31351	1,15832
380	215	129	0,2715	74,24	1,25	0,33947	1,20302
370	210	115	0,2825	73,58	1,1	0,31081	1,05517
360	205	100	0,2923	72,99	0,95	0,27777	0,90848
350	200	90	0,2955	72,80	0,87	0,25714	0,83113
340	195	80	0,3055	72,20	0,77	0,23529	0,73316
330	190	70	0,3030	72,36	0,7	0,21212	0,66708
320	185	61	0,3125	71,79	0,61	0,19062	0,57944
310	180	55	0,3225	71,18	0,55	0,17741	0,52059
300	173	48	0,3404	70,09	0,47	0,16	0,44192
290	167	42	0,3489	69,57	0,415	0,14482	0,38890
280	161	39	0,3816	67,56	0,365	0,13928	0,33737
270	156	35	0,4181	65,28	0,31	0,12962	0,28159
260	150	31	0,4258	64,79	0,28	0,11923	0,25334
250	145	29	0,4833	61,09	0,24	0,116	0,21010

Tabel 5.1 Hasil pengujian kondisi saturasi pada transformator satu fasa (lanjutan)

240	140	25	0,5208	58,61	0,2	0,10416	0,17073
230	134	22,9	0,5531	56,41	0,18	0,09956	0,14995
220	126	20,5	0,6011	53,04	0,155	0,09318	0,12386
210	120	19,1	0,6496	49,48	0,14	0,09095	0,10643
200	115	17	0,68	47,15	0,125	0,085	0,09165
190	110	15,9	0,6973	45,78	0,12	0,08368	0,08600
180	105	15	0,7246	43,56	0,115	0,08333	0,07924
170	100	13,5	0,7941	37,42	0,1	0,07941	0,06077
160	90	12	0,7894	37,86	0,095	0,075	0,05830
150	85	11	0,8239	34,51	0,089	0,07333	0,05043
140	80	10	0,8305	33,84	0,086	0,07142	0,04789
130	75	8,5	0,7877	38,02	0,083	0,06538	0,05112
120	70	7,5	0,7812	38,62	0,08	0,0625	0,04993
110	65	6,2	0,7416	42,12	0,076	0,05636	0,05098
100	57	5,4	0,7397	42,29	0,073	0,054	0,04912
90	50	4,6	0,7301	43,10	0,07	0,05111	0,04782
80	46	3,8	0,7089	44,85	0,067	0,0475	0,04725
70	40	3	0,6802	47,13	0,063	0,04285	0,04617
60	35	2,5	0,6944	46,01	0,06	0,04166	0,04317
50	30	1,65	0,5892	53,89	0,056	0,033	0,04524
40	24	1,1	0,55	56,63	0,05	0,0275	0,04175
30	19	0,7	0,5185	58,76	0,045	0,02333	0,03847
20	10	0,3	0,4054	66,08	0,037	0,015	0,03382
10	5	0,1	0,4	66,42	0,025	0,01	0,02291
0	0	0,01	0	0	0,01	0	0

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui proses pengujian dan analisis data mengenai Demagnetisasi Arus *Inrush* pada Transformator Satu Fasa 1 kVA Menggunakan Metode Pengurangan Sisa Medan Magnet dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya nilai arus *inrush* saat pertama kali dienergisasi dengan sumber tegangan bolak – balik bergantung pada sudut fasa tegangan tersebut dan besarnya fluks sisa yang terdapat pada inti besi transformator.
2. Alat Demagnetisasi Arus *Inrush* dengan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* terbukti berhasil melakukan proses pengurangan fluks sisa pada inti transformator satu fasa 1 kVA sehingga nilai dari arus *inrush* setelah didemagnetisasi bisa lebih rendah dari nilai arus *inrush* sebelum proses demagnetisasi dilakukan.
3. Semakin lama proses demagnetisasi dilakukan maka tidak menjamin penurunan arus *inrush* akan semakin besar karena belum tentu fluks sisa yang ada pada inti transformator menjadi semakin sedikit.
4. Hasil yang didapatkan ketika menggunakan alat demagnetisasi berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* bisa lebih optimal daripada alat demagnetisasi yang menggunakan metode *Variable Voltage – Constant Frequency*. Hal ini dibuktikan dengan perbedaan penurunan persentase arus *inrush* pada metode VFCV yang mencapai lebih dari 50% dan metode VVCF yang maksimal hanya mencapai 37,3%. Perbandingan ini tentunya dilakukan

dengan parameter transformator yang sama, serta interval antara proses energisasi dan demagnetisasi yang sama.

5. Proses demagnetisasi menggunakan alat demagnetisasi berbasis metode VFCV tidak bisa digunakan dalam frekuensi tinggi karena adanya penurunan tegangan yang cukup signifikan pada frekuensi diatas 10 kHz.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Alat demagnetisasi ini masih berupa *prototype* dan belum dikemas secara rapi agar mudah dibawa kemana – mana
2. Alat demagnetisasi berbasis metode *Variable Frequency – Constant Voltage* masih perlu disempurnakan lagi karena saat proses demagnetisasi berlangsung, terjadi penurunan nilai tegangan keluaran akibat proses pensaklaran.
3. Alat demagnetisasi ini hanya mampu diaplikasikan pada transformator satu fasa berdaya 1 kVA dengan pemotongan inti normal. Hipotesis ini didapatkan karena sudah teruji dan sudah dianalisa. Kedepannya diharapkan alat ini mampu diaplikasikan untuk transformator satu fasa dengan daya yang lebih tinggi dan dengan model pemotongan inti yang lain.
4. Efisiensi dari alat ini masih kurang karena membutuhkan 3 suplai sumber tegangan searah atau DC yang berbeda nilainya.
5. Diperlukan beberapa kali proses demagnetisasi untuk meyakinkan bahwa arus *inrush* saat transformator dienergisasi dapat berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Baris, L. d. Francisco, C. Dariusz, Z. Zivan, and B. Leo, “*Mitigation of Inrush Currents in Network Transformers by Reducing the Residual Flux with an Ultra-Low-Frequency Power Source*”, IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 3, pp. 1563 – 1570, July. 2011.
- [2] F. de Leon, Ashkan Farazmand, Saeed Jazebi, Digvijay Deswal, dan Raka Levi, “*Residual Flux in Transformer by Application of an Alternating Polarity DC Voltage Source*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, no. 4, August 2015.
- [3] H. Brunke and K. J. Frohlich, “*Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. I. Theoretical Considerations*”, IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 276–280, April. 2001.
- [4] H. Brunke and K. J. Frohlich, “*Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled switching. II. Application and Performance Considerations*”, IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 281–285, April. 2001.
- [5] F. de León, A. Farazmand, and P. Joseph, “*Comparing the T and Pi Equivalent Circuits for the Calculation of Transformer Inrush Currents*”, IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 4, pp. 2390–2398, October. 2012.
- [6] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar Gholamian, “*Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions*”, ISSN 1392-1215 ©2011
- [7] Moon Rena, Dhatrak, “*A study of Effect of Magnetizing Inrush Current on Different Ratings of Transformers*”, IJAREEIE, vol. 3, Issue 4, April 2014.
- [8] Firmansyah Mokhammad, IGN Satriyadi, Soedibjo, “*Studi Perbandingan Metode Pengurangan Arus Inrush pada Transformator Daya 500 kV GITET Krian*”, Jurnal Teknik Pomits, vol. 1, no. 1, pp. 1 – 6, 2014.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 23 Mei 1994 dengan nama lengkap Dicky Wahyu Darmawan, dari orang tua Wahyudi dan Sudarmi. Penulis menjalani masa kecilnya di Surabaya hingga saat ini. Penulis menamatkan pendidikan dasar di SDN Dr. Soetomo VI Surabaya (tahun 2006), pendidikan menengah di SMPN 12 Surabaya (tahun 2009) dan SMAN 15 Surabaya (tahun 2012). Saat ini penulis berusia 22 tahun dan sedang menempuh studi tingkat strata 1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai fokus studinya. Selama kuliah penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademis maupun non akademis. Penulis bergabung dengan karang taruna di lingkungan sekitar rumah (tahun 2012-2013) sebagai staf anggota, menjadi koordinator lapangan ELECTRA (tahun 2013), sebagai ketua sie perlengkapan EE EVENT (tahun 2014 – 2015) dan HIMATEKTRO ITS (tahun 2014-2015) sebagai elemen kaderisasi *Steering Committee*. Saat ini penulis dapat dihubungi melalui email: dicky.wahyu.1994@gmail.com.